

TUGAS AKHIR - MT 1702

**ANALISIS PENGARUH *FLOW RATE* DAN
PRESSURE PADA *IN SITU WELL REPAIR*
MENGUNAKAN MATERIAL *POLYACRYLAMIDE*
DENGAN *CFD-FEM COUPLING METHOD***

HALIDA AZMI FALAH
NRP 0251144000090

DOSEN PEMBIMBING
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D.
Sungging Pintowantoro, Ph.D.

PEMBIMBING EKSTERNAL
Dr. Sonny Irawan (Universiti Teknologi PETRONAS)

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018



TUGAS AKHIR - TL141584

**ANALISIS PENGARUH *FLOW RATE* DAN
PRESSURE PADA *IN SITU WELL REPAIR*
MENGUNAKAN MATERIAL
POLYACRYLAMIDE DENGAN CFD-FEM
*COUPLING METHOD***

Halida Azmi Falah
NRP 02511440000090

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D.
Sungging Pintowantoro, Ph.D.

Pembimbing Eksternal
Dr. Sonny Irawan (Universiti Teknologi PETRONAS)

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

(halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

EFFECT OF FLOW RATE AND PRESSURE ANALYSIS ON IN SITU WELL REPAIR WITH POLYACRYLAMIDE USING CFD-FEM COUPLING METHOD

Halida Azmi Falah
NRP 02511440000090

Advisor
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D.
Sungging Pintowantoro, Ph.D.

External Advisor
Dr. Sonny Irawan (Universiti Teknologi PETRONAS)

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2018

(this page is intentionally left blank)

**ANALISIS PENGARUH *FLOW RATE* DAN *PRESSURE*
PADA *IN SITU WELL REPAIR* MENGGUNAKAN
MATERIAL *POLYACRYLAMIDE* DENGAN *CFD-FEM*
*COUPLING METHOD***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
Memperoleh gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

HALIDA AZMI FALAH
NRP 02511440000090

Disetujui oleh tim penguji tugas akhir:

1. Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D. (Pembimbing I)
2. Sungging Pintowantoro, Ph.D. (Pembimbing II)



(halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS PENGARUH *FLOW RATE* DAN *PRESSURE*
PADA *IN SITU WELL REPAIR* MENGGUNAKAN
MATERIAL *POLYACRYLAMIDE* DENGAN *CFD-FEM*
*COUPLING METHOD***

Nama : Halida Azmi Falah
NRP : 02511440000090
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D.
Sungging Pintowantoro, Ph.D.
Pembimbing Eksternal : Dr. Sonny Irawan
(Universiti Teknologi PETRONAS)

Abstrak

Kebocoran pipa produksi (production tubing) dalam kegiatan eksplorasi minyak bumi dan gas alam dapat mengganggu proses produksi. Untuk itu, diperlukan metode yang tepat untuk memperbaiki kebocoran tubing tanpa menghentikan proses (shutdown). Salah satu metode perbaikan yang dapat digunakan adalah in situ well repair. In situ well repair dilakukan dengan penambalan (patching) menggunakan polimer superabsorbent jenis polyacrylamide pada flow rate dan tekanan tertentu. Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan CFD dan FEM untuk menganalisis pengaruh tekanan dan flow rate yang menghasilkan kemampuan in situ well repair paling optimum untuk mengatasi kebocoran tubing dengan menggunakan software ANSYS. Hasil yang diperoleh yaitu semakin besar flow rate dan tekanan, maka akan semakin besar pula kemungkinan terjadinya deformasi patch pada lokasi in situ well repair. Flow rate yang menghasilkan kemampuan in situ well repair paling optimum adalah 1000 bpd dengan nilai tekanan sebesar 36,82 Pa pada lokasi patch dengan jarak 180 inch dari dasar tubing.

Kata kunci: In Situ Well Repair, Kebocoran Tubing, Patching Polyacrylamide

(halaman ini sengaja dikosongkan)

EFFECT OF FLOW RATE AND PRESSURE ANALYSIS ON IN SITU WELL REPAIR WITH POLYACRYLAMIDE USING CFD-FEM COUPLING METHOD

Name : Halida Azmi Falah
SRN : 02511440000090
Major : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor : Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D.
Sungging Pintowantoro, Ph.D.
External Advisor : Dr. Sonny Irawan
(Universiti Teknologi PETRONAS)

Abstract

Leakage of production tubing in crude oil and natural gas exploration activities may disrupt production processes. Therefore, a proper method is needed to repair the tubing leakage without shut the process down. One of improvement method that can be used is in situ well repair. In situ well repair is done by patching using superabsorbent polymer, in this case is polyacrylamide, at certain flow rate and pressure. In this research, simulation using CFD and FEM is used to analyse the effect of flow rate and pressure that give the most optimum in situ well repair capability to overcome tubing leakage using ANSYS software. The results obtained are the greater flow rate and pressure, the greater possibility of patch deformation at the location of in situ well repair. Flow rate that produces the most optimum in situ well repair capability is 1000 bpd with a pressure value of 36,82 Pa at the patch site with a distance of 180 inches from the bottom of the tubing

Keywords: In Situ Well Repair, Patching, Polyacrylamide, Tubing Leakage

(this page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa. Atas berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan untuk memenuhi syarat kelulusan mata kuliah Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh *Flow Rate* dan *Pressure* pada *In Situ Well Repair* Menggunakan Material *Polyacrylamide* dengan CFD-FEM *Coupling Method*”. Penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan bimbingan, dukungan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan ini dapat terselesaikan, di antaranya:

1. Allah SWT yang telah memberikan kelancaran pengerjaan tugas akhir.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, semangat, dan motivasi.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D. dan Bapak Sungging Pintowantoro, Ph.D. selaku dosen pembimbing serta Bapak Dr. Sonny Irawan selaku pembimbing eksternal.
4. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng. selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
5. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc. selaku koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat terbuka dalam menerima kritik dan saran yang membangun untuk memperbaiki laporan tugas akhir ini.

Surabaya, 10 Januari 2018
Penulis,

Halida Azmi Falah
02511440000090

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Model dan Pola Aliran	9
2.3 Aliran <i>Multiphase</i>	10
2.4 Kehilangan Tekanan (<i>Pressure Loss</i>)	11
2.5 Kontruksi Sumur Pengeboran (<i>Well Construction</i>)	12
2.6 Kebocoran pada <i>Casing</i>	13
2.7 <i>In Situ Patch Repair</i>	15
2.8 Pipa Produksi	18
2.9 <i>Polyacrylamide</i>	20
2.10 Minyak Mentah dan Gas Alam	23
2.11 Model Matematika pada Kebocoran Pipa Vertikal	24
2.12 Metode Elemen Hingga	26
2.13 Komputasi Dinamika Fluida	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian	29
3.2 Material Penelitian	30
3.3 Peralatan Penelitian.....	36
3.4 Variabel Penelitian.....	36

3.5	Prosedur Penelitian	37
3.6	Langkah Penelitian.....	45
BAB IV HASIL DATA DAN PEMBAHASAN		
4.1	Analisis Pengaruh <i>Flow Rate</i> 1000 bpd.....	47
4.2	Analisis Pengaruh <i>Flow Rate</i> 1050 bpd.....	64
4.3	Analisis Pengaruh <i>Flow Rate</i> 1100 bpd.....	80
4.4	Analisis Pengaruh <i>Flow Rate</i> 1150 bpd.....	96
4.5	Analisis Pengaruh <i>Flow Rate</i> 1200 bpd.....	112
4.6	Analisis <i>Flow Rate</i> dan Tekanan Optimum	128
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	131
5.2	Saran	131
DAFTAR PUSTAKA.....		xxiii
LAMPIRAN		xxvii
UCAPAN TERIMA KASIH		xxix
BIODATA PENULIS.....		xxxiii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pola Aliran dalam Pipa	9
Gambar 2.2 Model Rheologi dari Berbagai Tipe Fluida	10
Gambar 2.3 <i>Well Casing</i>	12
Gambar 2.4 Kebocoran pada <i>Casing</i> akibat Korosi	14
Gambar 2.5 Prosedur Pemasangan <i>Internal Steel Liner Casing Patch</i>	17
Gambar 2.6 Struktur Mikro Baja N80	19
Gambar 2.7 Struktur <i>Polyacrylamide</i>	21
Gambar 2.8 Hidrokarbon Dasar	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2 Skema Sumur Produksi	32
Gambar 3.3 Skema Kebocoran <i>Tubing</i>	33
Gambar 3.4 Geometri Pipa Penelitian	34
Gambar 3.5 Diameter dan Ketebalan Pipa	34
Gambar 3.6 Diameter Lubang	35
Gambar 3.7 Jarak antar Lubang	35
Gambar 3.8 Diagram Alir Permodelan	38
Gambar 3.9 <i>Meshing</i> Kasar pada <i>Tubing</i>	39
Gambar 3.10 Detail <i>Meshing</i> Kasar pada Lubang	39
Gambar 3.11 <i>Meshing</i> Medium pada <i>Tubing</i>	40
Gambar 3.12 Detail <i>Meshing</i> Medium pada Lubang	40
Gambar 3.13 <i>Meshing</i> Halus pada <i>Tubing</i>	41
Gambar 3.14 Detail <i>Meshing</i> Halus pada Lubang	41
Gambar 3.15 <i>Fluent General Setup</i>	42
Gambar 3.16 <i>Multiphase Model</i>	43
Gambar 3.17 <i>Fixed Support</i>	44
Gambar 3.18 <i>Fluid-Solid Interface</i>	45
Gambar 4.1 <i>Pressure Drop</i> pada <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	49
Gambar 4.2 Distribusi Tekanan Sepanjang <i>Tubing</i> dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	50
Gambar 4.3 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Pertama dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	51

Gambar 4.4 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Kedua dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	52
Gambar 4.5 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Ketiga dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	53
Gambar 4.6 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Keempat dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	54
Gambar 4.7 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Kelima dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	55
Gambar 4.8 Deformasi pada <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	57
Gambar 4.9 Deformasi Sepanjang <i>Tubing</i> dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	58
Gambar 4.10 Deformasi pada <i>Patch</i> Pertama dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	59
Gambar 4.11 Deformasi pada <i>Patch</i> Kedua dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	60
Gambar 4.12 Deformasi pada <i>Patch</i> Ketiga dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	61
Gambar 4.13 Deformasi pada <i>Patch</i> Keempat dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	62
Gambar 4.14 Deformasi pada <i>Patch</i> Kelima dengan <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	63
Gambar 4.15 <i>Pressure Drop</i> pada <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	65
Gambar 4.16 Distribusi Tekanan Sepanjang <i>Tubing</i> dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	66
Gambar 4.17 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Pertama dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	67
Gambar 4.18 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Kedua dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	68
Gambar 4.19 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Ketiga dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	69
Gambar 4.20 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Keempat dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	70
Gambar 4.21 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Kelima dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	71
Gambar 4.22 Deformasi pada <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	73

Gambar 4.23 Deformasi Sepanjang <i>Tubing</i> dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	74
Gambar 4.24 Deformasi pada <i>Patch</i> Pertama dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	75
Gambar 4.25 Deformasi pada <i>Patch</i> Kedua dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	76
Gambar 4.26 Deformasi pada <i>Patch</i> Ketiga dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	77
Gambar 4.27 Deformasi pada <i>Patch</i> Keempat dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	78
Gambar 4.28 Deformasi pada <i>Patch</i> Kelima dengan <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	79
Gambar 4.29 <i>Pressure Drop</i> pada <i>Flow Rate</i> 1100 bpd	81
Gambar 4.30 Distribusi Tekanan Sepanjang <i>Tubing</i> dengan <i>Flow</i> <i>Rate</i> 1100 bpd	82
Gambar 4.31 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Pertama dengan <i>Flow Rate</i> 1100 bpd.....	83
Gambar 4.32 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Kedua dengan <i>Flow</i> <i>Rate</i> 1100 bpd	84
Gambar 4.33 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Ketiga dengan <i>Flow</i> <i>Rate</i> 1100 bpd	85
Gambar 4.34 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Keempat dengan <i>Flow Rate</i> 1100 bpd.....	86
Gambar 4.35 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Kelima dengan <i>Flow</i> <i>Rate</i> 1100 bpd	87
Gambar 4.36 Deformasi pada <i>Flow Rate</i> 1100 bpd	89
Gambar 4.37 Deformasi Sepanjang <i>Tubing</i> dengan <i>Flow Rate</i> 1100 bpd	90
Gambar 4.38 Deformasi pada <i>Patch</i> Pertama dengan <i>Flow Rate</i> 1100 bpd	91
Gambar 4.39 Deformasi pada <i>Patch</i> Kedua dengan <i>Flow Rate</i> 1100 bpd	92
Gambar 4.40 Deformasi pada <i>Patch</i> Ketiga dengan <i>Flow Rate</i> 1100 bpd	93

Gambar 4.41 Deformasi pada <i>Patch</i> Keempat dengan <i>Flow Rate</i> 1100 bpd	94
Gambar 4.42 Deformasi pada <i>Patch</i> Kelima dengan <i>Flow Rate</i> 1100 bpd	95
Gambar 4.43 <i>Pressure Drop</i> pada <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	97
Gambar 4.44 Distribusi Tekanan Sepanjang <i>Tubing</i> dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	98
Gambar 4.45 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Pertama dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	99
Gambar 4.46 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Kedua dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	100
Gambar 4.47 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Ketiga dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	101
Gambar 4.48 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Keempat dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	102
Gambar 4.49 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Kelima dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	103
Gambar 4.50 Deformasi pada <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	105
Gambar 4.51 Deformasi Sepanjang <i>Tubing</i> dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	106
Gambar 4.52 Deformasi pada <i>Patch</i> Pertama dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	107
Gambar 4.53 Deformasi pada <i>Patch</i> Kedua dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	108
Gambar 4.54 Deformasi pada <i>Patch</i> Ketiga dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	109
Gambar 4.55 Deformasi pada <i>Patch</i> Keempat dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	110
Gambar 4.56 Deformasi pada <i>Patch</i> Kelima dengan <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	111
Gambar 4.57 <i>Pressure Drop</i> pada <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	113
Gambar 4.58 Distribusi Tekanan Sepanjang <i>Tubing</i> dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	114
Gambar 4.59 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Pertama dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	115

Gambar 4.60 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Kedua dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	116
Gambar 4.61 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Ketiga dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	117
Gambar 4.62 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Keempat dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	118
Gambar 4.63 Distribusi Tekanan pada <i>Patch</i> Kelima dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	119
Gambar 4.64 Deformasi pada <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	121
Gambar 4.65 Deformasi Sepanjang <i>Tubing</i> dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	122
Gambar 4.66 Deformasi pada <i>Patch</i> Pertama dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	123
Gambar 4.67 Deformasi pada <i>Patch</i> Kedua dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	124
Gambar 4.68 Deformasi pada <i>Patch</i> Ketiga dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	125
Gambar 4.69 Deformasi pada <i>Patch</i> Keempat dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	126
Gambar 4.70 Deformasi pada <i>Patch</i> Kelima dengan <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	127

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian tentang Perbaikan Kebocoran.....	6
Tabel 2.2 Penelitian tentang Simulasi Kebocoran pada <i>Pipeline</i> ..	7
Tabel 2.3 Lokasi dan Kedalaman Kebocoran.....	15
Tabel 2.4 Komposisi Kimia <i>Tubing</i> N80	19
Tabel 2.5 Sifat Mekanik <i>Tubing</i>	20
Tabel 3.1 Spesifikasi Material <i>Tubing</i> N80.....	30
Tabel 3.2 Sifat Material <i>Polyacrylamide</i>	30
Tabel 3.3 Sifat <i>Crude Oil</i> dan <i>Natural Gas</i>	31
Tabel 3.4 Kondisi Operasi Fluida dan <i>Tubing</i>	31
Tabel 3.5 Dimensi Geometri Penelitian	33
Tabel 3.6 Detail <i>Meshing</i>	37
Tabel 4.1 Nilai Tekanan pada <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	48
Tabel 4.2 Deformasi pada <i>Flow Rate</i> 1000 bpd	56
Tabel 4.3 Nilai Tekanan pada <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	64
Tabel 4.4 Deformasi pada <i>Flow Rate</i> 1050 bpd	72
Tabel 4.5 Nilai Tekanan pada <i>Flow Rate</i> 1100 bpd	80
Tabel 4.6 Deformasi pada <i>Flow Rate</i> 1100 bpd	88
Tabel 4.7 Nilai Tekanan pada <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	96
Tabel 4.8 Deformasi pada <i>Flow Rate</i> 1150 bpd	104
Tabel 4.9 Nilai Tekanan pada <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	112
Tabel 4.10 Deformasi pada <i>Flow Rate</i> 1200 bpd	120

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Minyak bumi dan gas alam merupakan sumber energi yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Kebutuhan bahan bakar minyak di Indonesia semakin meningkat setiap tahunnya dikarenakan bertambahnya jumlah konsumen bahan bakar. Berdasarkan data BP Global, pada tahun 2016 Indonesia berada di peringkat 24 dunia sebagai produsen minyak. Data yang diterbitkan oleh SKK Migas menyebutkan bahwa jumlah minyak rata-rata yang mampu diproduksi oleh Indonesia yaitu sebanyak 786 ribu barrel per hari.

Kegiatan eksplorasi minyak bumi dan gas alam sebagian besar melibatkan jaringan perpipaan (*pipeline*) sebagai tempat pendistribusian fluida. Oleh karena itu, kehandalan sistem *pipeline* sangat diperlukan pada setiap industri minyak dan gas untuk mencegah terjadinya kegagalan. Berikut ini beberapa contoh kegagalan sistem perpipaan yang pernah terjadi pada industri perminyakan di Indonesia:

1. Kebocoran pipa gas milik Exxon Mobil Oil Indonesia di Kabupaten Aceh Utara (23 Maret 2005).
2. Kebocoran pipa produksi Pertamina EPRS di Kota Prabumulih (14 Juni 2008).
3. Pecahnya pipa minyak Pertamina di region Sumatera-Prabumulih (24 November 2009).
4. Kebocoran pipa produksi PT Chevron Pasific Indonesia (28 Oktober 2010).

Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan pada sistem *pipeline* tersebut antara lain korosi, kegagalan perawatan, kegiatan masyarakat di sekitar jalur pipa (*third party activities*), faktor alam, kesalahan operasional, dan kegagalan mekanik (Hendrizal & Djunaidi, 2013). Kegagalan yang berupa kebocoran pada pipa produksi (*production tubing*) dapat mengakibatkan penurunan kemampuan selama proses produksi.



Metode perbaikan *production tubing* secara konvensional membutuhkan waktu lama, biaya mahal, dan memiliki risiko yang tinggi pada pengerjaan *rig* karena harus mematikan (*shutdown*) sumur bor. Metode ini dilakukan dengan mengganti *production tubing* dan *packer* setelah proses produksi pada sumur berhenti. Selain itu, metode penambalan tersebut masih kurang praktis dan operasi pengerjaan selanjutnya pada *production tubing* sulit dilakukan.

Untuk mengatasi kebocoran tanpa melakukan *shutdown* pada proses tersebut, telah dikembangkan dan dipatenkan metode perbaikan dengan cara penambalan (*patch repair*) oleh Drillflex Company of Rennes di Perancis, dimulai pada tahun 1994. Pada tahun 1995 dan 1996, lebih dari empat puluh tambalan (*patch*) telah dipasang di sumur uji yang dangkal di Rennes dengan berbagai kondisi lubang bawah permukaan (Styler, Al-Suwailem, Akhnoukh, & Leighton, 2001). Polimer *superabsorbent* dengan sifat khusus yang dapat menyerap dan menjaga sejumlah besar fluida encer pada kondisi panas dan tekanan tertentu dapat digunakan untuk mencegah atau membatasi aliran fluida melalui kebocoran pipa (Ibrahim & Irawan, 2016).

Metode *patch repair* bukan merupakan suatu kegiatan yang mudah untuk dilakukan pada *production tubing* karena memiliki parameter-parameter tertentu yang harus dikontrol, seperti *flow rate* dan tekanan fluida serta temperatur *production tubing*. Selain itu, juga dibutuhkan biaya yang banyak untuk melaksanakan metode *patch repair* dalam mengatasi kebocoran *tubing*. Agar realisasi metode tersebut nantinya dapat berjalan secara efektif, diperlukan penelitian berbasis simulasi untuk *patch repair* secara *in situ* tanpa melakukan *shutdown* pada *production tubing*. Dalam penelitian ini, akan dilakukan simulasi dengan komputasi dinamika fluida serta metode elemen hingga untuk menganalisis pengaruh *flow rate* dan tekanan yang menghasilkan kemampuan *in situ well repair* paling optimum untuk mengatasi kebocoran *tubing* dengan menggunakan *software* ANSYS.



1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *flow rate* pada lokasi *in situ well repair* terhadap kemungkinan terjadinya deformasi *patch*?
2. Bagaimana pengaruh tekanan pada lokasi *in situ well repair* terhadap kemungkinan terjadinya deformasi *patch*?
3. Bagaimana *flow rate* dan tekanan yang menghasilkan kemampuan *in situ well repair* paling optimum untuk mengatasi kebocoran *tubing*?

1.3 Batasan Masalah

Untuk memperoleh hasil akhir yang baik serta tidak menyimpang dari permasalahan, maka penelitian ini dibatasi dan diasumsikan sebagai:

1. Fluida diasumsikan bersifat Newtonian, *incompressible*, isothermal, serta memiliki sifat fisik dan kimia konstan.
2. Aliran fluida diasumsikan berada pada kondisi *steady state*.
3. Perbedaan temperatur sepanjang *tubing* diabaikan.
4. Adanya kehilangan tekanan diasumsikan hanya dipengaruhi oleh variasi kedalaman dan tekanan eksternal dianggap tidak berpengaruh.
5. Properti *tubing* diasumsikan tidak berpengaruh terhadap kemampuan pelekatan *patch*.
6. Kerusakan pada *patch* diasumsikan hanya terjadi akibat adanya pengaruh *flow rate* dan tekanan.
7. Geometri kebocoran dan *patch* diasumsikan memiliki bentuk dan ukuran yang sama.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian tugas akhir ini yaitu:

1. Menganalisis pengaruh *flow rate* pada lokasi *in situ well repair* terhadap kemungkinan terjadinya deformasi.
2. Menganalisis pengaruh tekanan pada lokasi *in situ well repair* terhadap kemungkinan terjadinya deformasi.



3. Menganalisis *flow rate* dan tekanan yang menghasilkan kemampuan *in situ well repair* paling optimum untuk mengatasi kebocoran *tubing*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Dapat mengaplikasikan ilmu material dan metalurgi yang telah dipelajari di bangku perkuliahan
2. Dapat mensimulasikan *flow rate* dan tekanan yang menghasilkan kemampuan *in situ well repair* paling optimum untuk mengatasi kebocoran *tubing*.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Menurut Ibrahim dan Sonny (2016), kebocoran pada *tubing* dapat terjadi akibat korosi, *sand blasting*, dan tekanan terlalu tinggi. Kebocoran pada *tubing* dapat menyebabkan aliran fluida dari *production tubing* ke *A-annulus* (*annulus* di antara *production tubing* dan *production casing*) karena ada perbedaan tekanan. Jika hal tersebut terjadi, maka proses yang berjalan pada sumur pengeboran harus dihentikan. Penelitian yang dilakukan Ibrahim dan Sonny adalah memodifikasi sifat polimer untuk aplikasi *well repair* pada kebocoran *tubing* dengan mencampurkan *polyacrylamide* dan *amino alcohols*. Hasil yang diperoleh yaitu sifat unik dari modifikasi polimer yang sensitif terhadap temperatur, pH, dan konsentrasi garam dapat digunakan untuk menambal kebocoran *tubing*.

Styler, dkk (2001) mengatakan bahwa metode perbaikan tradisional untuk kebocoran *casing* dilakukan dengan menarik *tubing* dari sumur kemudian menempatkan *scab liner* di atas kebocoran. Bagian lubang yang terbuka diisi dengan *chip* kalsium karbonat untuk membatasi hilangnya fluida dan melindungi interval injeksi dari kerusakan selama masa kerja. Pemberian semen pada *scab liner* biasanya sulit dilakukan tanpa adanya tekanan *squeeze*.

Teknologi baru yang menawarkan alternatif lain yaitu *non-metal patch*, terdiri atas komposit *sleeve* fleksibel yang terbuat dari resin *thermosetting* dengan penguat *carbon fiber*, dan ditutup dengan kulit luar elastomer. Komposit tersebut dilipat ke bawah lubang untuk menghubungkan *tubing* atau *casing wall*, kemudian dipanaskan dengan kabel elektrik untuk mempolimerisasikan resin sehingga terbentuk *patch* yang keras dan permanen (Styler, Al-Suwailem, Akhnoukh, & Leighton, 2001).

Berdasarkan penelitian Ouyang (2015), kebocoran dapat terjadi melalui *tubing*, *casing*, atau *packer*. Kebocoran *tubing*



mengakibatkan perubahan signifikan pada tekanan *annular*. Parameter utama yang berpengaruh pada profil tekanan *annulus* awal adalah pemompaan fluida pengeboran (waktu, sifat fluida, temperatur fluida, kecepatan pemompaan), interval waktu antara *drilling* dan resirkulasi *completion brine* (sifat *brine*, kecepatan pemompaan, temperatur, waktu, prosedur), profil temperatur lingkungan (geothermal), penutupan *annulus*, dan sebagainya.

Aliran fluida dan transfer panas yang berhubungan dengan kebocoran *tubing* merupakan proses *transient* (dinamis). Untuk aliran *monophasic transient* atau multi fase pada perpipaan atau pengeboran, dibutuhkan model *steady state*. Permodelan *transient* adalah metode paling esensial untuk studi dan desain yang dapat digunakan pada investigasi perilaku *transient* pipa dan sumur pengeboran baik *onshore* maupun *offshore* (Ouyang, 2015).

Beberapa penelitian berkaitan dengan metode *repair* dan simulasi kebocoran pada *pipeline* yang telah dilakukan dirangkum dalam Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Penelitian tentang Perbaikan Kebocoran

No	Tahun	Peneliti	Penelitian
1	2001	Styler	Mengembangkan teknik aplikasi <i>rigless</i> untuk memperbaiki kebocoran <i>casing</i> pada sumur. Metode <i>patching</i> ini memanfaatkan <i>electric-line-conveyed, non-metallic</i> , serta komposit yang tersusun dari elastomer dan <i>thermosetting</i> resin dengan penguat fiber. <i>Patch</i> tersebut sangat sesuai untuk <i>injection well tubular repair</i> .
2	2016	Genedy	Menguji efisiensi material <i>repair</i> berupa polimer nanokomposit yang diinjeksikan untuk menambal <i>micro annulus</i> pada



			sumur bor. Pengujian kekuatan ikatan <i>interface</i> menunjukkan bahwa material <i>microfine cement</i> yang diinjeksikan memiliki kekuatan ikatan yang rendah sedangkan ANPs-epoxy <i>nanocomposite</i> lebih tinggi.
3	2016	Todorovic	Menguji kemampuan <i>sealing</i> resin polimer yang peka terhadap perubahan temperatur untuk <i>squeeze cementing</i> . Resin polimer tersebut terbukti berhasil digunakan untuk menambal jalur kebocoran dari dua desain kebocoran yang berbeda: <i>cement-casing debonding</i> dan <i>fractures</i> pada <i>annular cement</i> .
4	2016	Ibrahim	Memodifikasi sifat polimer untuk aplikasi <i>well repair</i> pada kebocoran <i>tubing</i> dengan mencampurkan <i>polyacrylamide</i> dan <i>amino alcohols</i> . Hasilnya adalah sifat unik dari modifikasi polimer yang sensitif terhadap temperatur, pH, dan konsentrasi garam dapat digunakan untuk menambal kebocoran <i>tubing</i> .

Tabel 2.2 Penelitian tentang Simulasi Kebocoran pada *Pipeline*

No	Tahun	Peneliti	Penelitian
1	2012	Li Xuegang	Menganalisis <i>gas field engineering problem</i> menggunakan teori mekanika fluida untuk menyelesaikan <i>basic algoritm model</i> dan <i>software</i> untuk



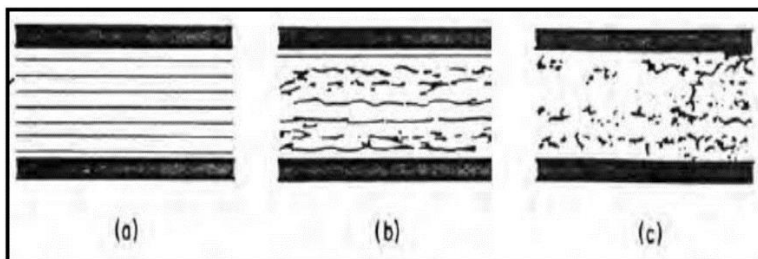
			mensimulasi fenomena difusi kebocoran gas alam. Diperoleh hasil perbandingan risiko area kebocoran yang disimulasikan secara numerik menggunakan <i>Fluent</i> dengan hasil eksperimen yang dilakukan.
2	2012	Wang	Menganalisis bahwa pengaruh <i>single phase flow</i> , <i>multiphase flow</i> , dan <i>phase transition</i> pada <i>crude oil</i> mengakibatkan proses kebocoran. Perbedaan proses penetrasi dan perbedaan konduktivitas termal yang memicu perbedaan <i>trend</i> temperatur <i>surface</i> pada kondisi proses kebocoran disimulasikan secara 3D.
3	2015	Ouyang	Memanfaatkan <i>software</i> simulator OLGA untuk simulasi <i>transient flow</i> dan <i>heat transfer</i> yang berhubungan dengan proses <i>drilling</i> , <i>completion</i> , dan injeksi CO ₂ . Hasilnya adalah dapat mendeteksi kebocoran CO ₂ dan mengestimasi titik kebocoran secara tepat serta mengambil tindakan untuk memperbaiki kebocoran.
4	2017	Sousa	Menganalisis <i>steady state dynamics behavior</i> untuk <i>oil flow</i> pada <i>pipeline</i> yang mengalami kebocoran. Dapat dievaluasi pengaruh kebocoran terhadap tekanan, <i>field</i> kecepatan, dan <i>flow rate</i> dalam simulasi 3D untuk



			mengidentifikasi pengaruh permasalahan parameter tersebut.
--	--	--	--

2.2 Model dan Pola Aliran

Penelitian pertama tentang pola aliran fluida dalam pipa dan tabung dilakukan oleh Osborne Reynolds. Dapat diidentifikasi dua jenis pola aliran utama seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Pola Aliran dalam Pipa: (a) Laminar, (b) Transisi, dan (c) Turbulen (Hermadi, 2010)

Pada jenis aliran laminar, lapisan fluida bergerak dalam arus *streamline* atau *laminar*. Tidak ada campuran mikroskopik atau makroskopik dalam lapisan aliran. System aliran laminar umumnya secara grafis diwakili oleh arus lurus.

Dalam aliran turbulen, ada gerakan acak yang tidak teratur dari fluida dalam arah melintang dengan aliran utama. Gerakan ini, fluktuasi yang tidak teratur dapat dianggap sebagai tumpang tindih pada gerakan rata-rata fluida.

Ada dua tipe dasar fluida, yaitu Newtonian dan non-Newtonian. Fluida Newtonian dicirikan oleh viskositas konstan pada suhu dan tekanan tertentu. Fluida Newtonian umumnya meliputi air, diesel, gliserin, dan *clear brine*.

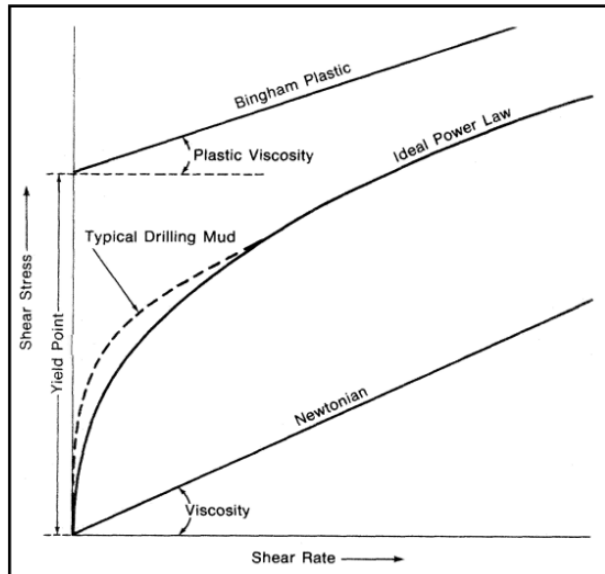
Fluida non-Newtonian memiliki viskositas yang bergantung pada laju geser yang diukur pada suhu dan tekanan tertentu. Contoh



cairan non-Newtonian meliputi fluida pengeboran pada umumnya dan *slurry* semen.

Model rheologi yang biasanya digunakan oleh industri perminyakan untuk menjelaskan fluida pengeboran adalah:

- Model fluida Newtonian
- Model fluida non-Newtonian – Bingham Plastic Power Law



Gambar 2.2 Model Rheologi dari Berbagai Tipe Fluida
(Hermadi, 2010)

2.3 Aliran *Multiphase*

Aliran *multiphase* adalah aliran dengan adanya perbedaan fasa secara bersama-sama, di mana fasa tersebut mengacu pada *solid*, *liquid*, atau *vapor*. Ada empat kategori utama aliran *multiphase*: *gas-liquid*, *gas-solid*, *liquid-solid*, dan aliran tiga fasa.

Pendekatan permodelan ketiga adalah metode *volume of fluid* (VOF). VOF termasuk dalam kerangka Euler-Euler, di mana semua fasa dianggap kontinu, namun model VOF tidak



memungkinkan terjadinya *interpenetrating*. Metode VOF menggunakan fungsi indikator fasa, terkadang disebut *colour function*, untuk mengetahui *interface* di antara dua fasa atau lebih.

Fungsi indikator memiliki nilai satu atau nol bila kontrol volume seluruhnya diisi dengan salah satu fasa, dan nilai antara satu dan nol jika ada *interface* pada kontrol volume. Oleh karena itu, fungsi indikator fasa memiliki sifat fraksi volume. Persamaan transport dipecahkan untuk sifat campuran tanpa kecepatan *slip*, artinya semua variabel diasumsikan sebagai bidang yang digunakan bersama-sama antara fasa. Untuk mendapatkan *interface* yang tajam, diskretisasi persamaan fungsi indikator sangat penting dilakukan.

2.4 Kehilangan Tekanan (*Pressure Loss*)

Setiap fluida yang mengalir dalam pipa akan kehilangan sebagian energinya, yang terserap akibat adanya gesekan yang bekerja pada fluida tersebut. Gaya gesekan pada fluida meliputi:

- Gesekan internal karena viskositas fluida
- Gesekan eksternal karena kekerasan pipa

Hilangnya energi ini disebut sebagai kehilangan tekanan (*pressure drop* atau *loss*), dan dihitung berdasarkan perbedaan tekanan fluida tersebut di antara dua titik di pipa. Kehilangan tekanan dapat terjadi di sepanjang sistem sirkulasi. Kehilangan tekanan tersebut terjadi meliputi pada:

- Sambungan peralatan permukaan
- Di dalam pipa, termasuk *drill pipe* dan *drill collar*
- *Annulus* antara lubang sumur dan *drill string*
- *Drill bit*

Persamaan kehilangan tekanan dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut:

- Reologi fluida
- Tipe aliran (laminar atau turbulen)
- Geometri lubang sumur dan pipa

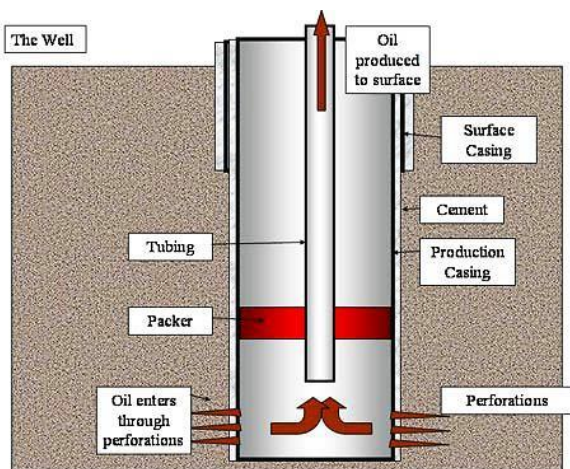


2.5 Kontruksi Sumur Pengeboran (*Well Construction*)

Completion sumur pengeboran minyak terdiri dari beberapa langkah, seperti pemasangan *well casing*, *completion*, pemasangan *wellhead*, dan pemasangan *lifting equipment* atau memperbaiki *formation* jika diperlukan.

2.5.1 *Well Casing*

Well casing terdiri dari serangkaian pipa logam yang dipasang di lubang pengeboran. *Casing* digunakan untuk memperkuat sisi lubang pengeboran, memastikan bahwa tidak ada minyak atau gas alam yang merembes ke permukaan, dan menjaga fluida atau gas lain merembes melalui *formation* sumur. Jenis *casing* yang digunakan bergantung pada karakteristik *subsurface* sumur, termasuk diameter sumur serta tekanan dan temperatur yang diberikan.



Gambar 2.3 *Well Casing*
(Devold, 2013)

Setelah *casing* dipasang, *tubing* dimasukkan ke dalam *casing* dari lubang sumur di bagian atas hingga *formation underground*. Hidrokarbon yang diekstraksi mengalir dari *tubing*



ke permukaan. Panjang *production casing* biasanya 5 sampai 28 cm (2-11 in) dengan sebagian besar sumur produksi berukuran 6 inch atau lebih. Produksi bergantung pada *reservoir*, *bore*, tekanan, dan sebagainya, dan kurang dari 100 barrel per hari hingga beberapa ribu barrel per hari (5000 bpd kira-kira 555 liter/menit).

2.5.2 *Well Completion*

Well completion umumnya mengacu pada proses *finishing* sumur hingga siap untuk memproduksi minyak atau gas alam. Intinya, *completion* terdiri dari penentuan karakteristik jumlah pipa yang masuk pada sumur dalam *formation* hidrokarbon yang ditargetkan.

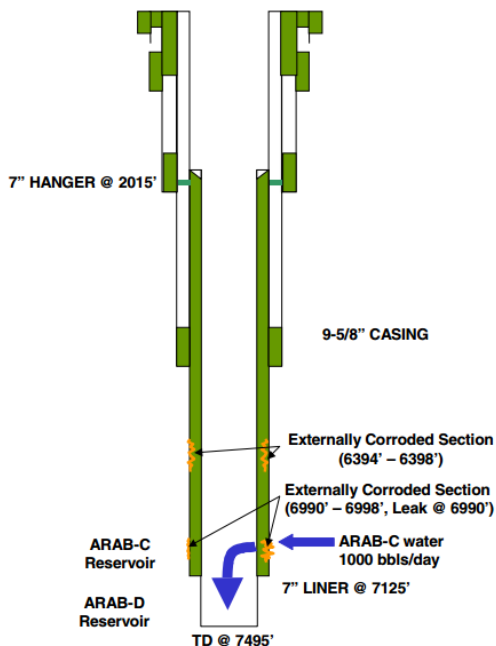
2.5.3 *Wellhead*

Wellhead bisa melibatkan *dry* atau *subsea completion*. *Dry completion* berarti bahwa sumur berada pada *onshore* atau bagian atas struktur pada instalasi *offshore*. *Subsea wellheads* terletak di bawah air pada *special sea bed template*.

Wellhead memiliki peralatan yang dipasang pada pembukaan sumur untuk mengatur dan memantau ekstraksi hidrokarbon dari *formation* bawah tanah. Hal ini juga mencegah kebocoran minyak atau gas alam keluar dari sumur dan mencegah ledakan karena *formation* tekanan tinggi. *Formation* biasanya membutuhkan *wellhead* yang dapat menahan tekanan sebesar 140 MPa (1400 bar) yang ditimbulkan oleh gas dan fluida. *Wellhead* terdiri dari tiga komponen: *casing head*, *tubing head*, dan “*Christmas tree*”.

2.6 Kebocoran pada *Casing*

Kebocoran pada *casing* (*casing leak*) pada umumnya berhubungan dengan korosi eksternal dari *formation water-bearing* pada sumur yang tidak disemen. Akan tetapi, faktor lain termasuk pemasangan *tubing* yang terlalu tinggi pada sumur bor, tingkat produksi fluida berlebihan, dan upaya pengendalian korosi yang buruk juga menyebabkan kebocoran pada *casing*.



Gambar 2.4 Kebocoran pada *Casing* akibat Korosi
(Styler, Al-Suwailem, Akhnoukh, & Leighton, 2001)

Volume kebocoran minyak dapat terjadi dalam skala kecil maupun besar. Jika volume kebocoran terjadi dalam skala kecil atau kurang dari nilai ambang tertentu (misalkan 15 bbl) maka kemungkinan bahwa minyak itu terdegradasi secara alamiah sangat besar. Jika kebocoran yang terjadi dalam skala besar (melebihi nilai ambang) kerugian yang akan ditanggung oleh masyarakat dan perusahaan akan sangat banyak.

Kebocoran yang terjadi di bawah permukaan laut kemungkinan akan memberikan volume kebocoran yang lebih kecil dibandingkan jika kebocoran tersebut terjadi di bawah permukaan tanah. Hal ini disebabkan oleh tekanan di bawah permukaan laut biasanya lebih besar dari tekanan di bawah permukaan tanah.



Bila ditemukan kebocoran pada *casing*, harus segera diketahui kedalaman dan luasnya untuk menentukan seberapa jauh hal tersebut telah terjadi. Pilihan *casing repair* tergantung pada ukuran dan kondisi *casing*, kedalaman dan tingkat kebocoran, serta produktivitas sumur.

Metode perbaikan kebocoran *casing* yang dapat digunakan adalah *cement squeezing*, *running casing liner* atau *patch*, *shut-in polymer water*, dan untuk lubang pada *casing* di atas permukaan *casing shoe* dilakukan pencopotan dan penggantian *casing*.

Tabel 2.3 menunjukkan kedalaman rata-rata kedalaman *casing* yang sering terjadi kebocoran pada lokasi pengeboran di Manitoba, Kanada.

Tabel 2.3 Lokasi dan Kedalaman Kebocoran (Wells with Casing Leaks, 2004)

Lokasi	Kisaran Kedalaman (m)
Waskada	-357 hingga -447
Coulter	-468 hingga -493
Pierson	-433 hingga -536
Tilston	-378 hingga -427
Lulu Lake	-269 hingga -286
Mountainside	-249 hingga -310
Whitewater	-240 hingga -260
Regent	-230 hingga -250
Souris Hartney	-165 hingga -199
Virden	-103 hingga -199
Daly	-198 hingga -302
Kirkella	-150 hingga -196
Birdtail	-4 hingga -8

2.7 *In Situ Patch Repair*

Teknologi *patch* telah dikembangkan dan dipatenkan oleh Drillflex Company of Rennes, Perancis dimulai pada tahun 1994. Material komposit, yaitu resin, fiber, dan elastomer digunakan dengan memanfaatkan sifat resin yang lembut dan fleksibel,

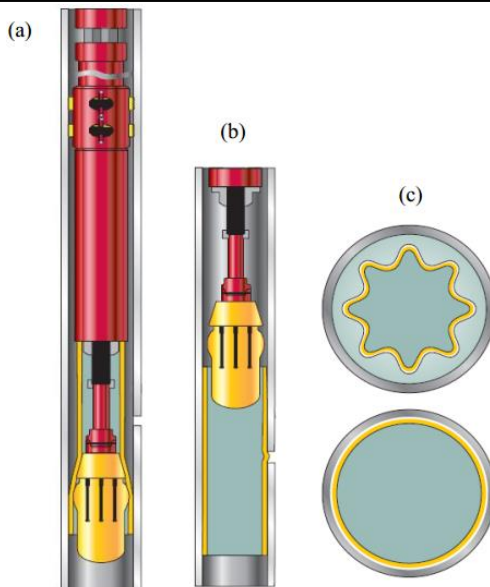


sehingga sesuai dengan permukaan yang akan ditambah ketika *patch* tersebut dipasang. Kekerasan dan kekuatan resin bertambah dengan adanya fiber setelah terjadi polimerisasi. Sehingga ikatan *crosslink* resin terjadi pada lokasi *patch repair* tertentu. Hasilnya adalah sebuah *patch* dengan permukaan bulat yang seragam.

Penambalan adalah alternatif memperbaiki kebocoran *casing*. *Casing patch* yang *dicoating* dengan resin epoksi pada permukaan luar sebelum ditempatkan pada daerah yang diinginkan dapat digunakan untuk mengganti bagian yang rusak. Perluasan pemasangan digunakan untuk memperluas *patch* terhadap *casing*.

Patch terdiri dari dua bagian utam, yaitu *sleeve* yang terbuat dari elastomer, resin, dan *fiber*, yang seluruhnya diturunkan setelah terpasang, serta *inflatable setting element* (ISE) yang tersusun di dalam *sleeve* dan terhubung pada alat yang akan dijalankan. Komponen ini berfungsi sebagai kantong udara dan berisi hambatan listrik terbaru untuk memanaskan dan mempolimerisasi resin. Alat yang dijalankan berisi *casing collar locator* (CCL) listrik dan dihubungkan dengan kabel. Dalam CCL, terdapat pendeteksi kebocoran berupa *gamma ray detector*.

Contoh pemasangan *casing patch* ditunjukkan pada Gambar 2.5. *Casing patch* yang diperluas menempel pada dinding *casing* akibat gesekan yang diakibatkan oleh tegangan tekan. Selama perluasan, resin epoksi mengisi kekosongan di dalam *casing* dan menjadi penutup tambahan. Teknik ini mengakibatkan hubungan hidrolis dan *gastight* antara *casing* lama dan baru. Operasi *patching casing* biasanya memakan waktu kurang dari seminggu.



Gambar 2.5 Prosedur Pemasangan *Internal Steel Liner Casing Patch*: (a) setelah menempatkan pada interval yang diinginkan, *patch* akan meluas, (b) *patch* yang telah meluas menutupi bagian kebocoran, (c) tampak atas *casing patch* sebelum dan sesudah perluasan.

(Todorovic, Mitigation and Remediation of Leakage from Geological Storage, 2015)

Patch yang awalnya digunakan sebagai metode *through-tubing* untuk mematkan perforasi yang tidak diinginkan pada *casing*, juga dapat diaplikasikan pada berbagai keadaan lain. Saat ini, *patch* telah digunakan pada:

- *Casing repair*
- *Tubing repair*
- *Through-tubing water shutoff*
- *Through-tubing gas shutoff*
- Penutupan kebocoran *sliding sleeve* pada *tubing*



- Mengisolasi *perforation* untuk memodifikasi profil *water injection*

Karakteristik-karakteristik yang membuat metode ini dapat digunakan pada berbagai aplikasi yaitu:

- Kemampuan penutupan pada permukaan tak beraturan
- Ketahanan terhadap tekanan yang baik
- Kehilangan diameter dalam yang kecil
- Kemampuan untuk menutup lubang yang besar
- Gaya kecil dapat digunakan terhadap lubang bor atau pipa bor di sekeliling selama pengaturan sehingga dapat menghindari kerusakan jangka panjang
- Kemampuan untuk mengatur jarak dari satu sisi ke sisi lain dengan diameter dalam yang berbeda, berat atau ukuran *casing* yang berbeda.

2.8 Pipa Produksi

Dalam dunia perminyakan, pipa produksi (*production tubing*) dikategorikan sebagai pipa yang memiliki diameter luar antara 23/8 hingga 4 ½ inch. *Tubing* adalah wadah mengalirnya minyak bumi dan gas alam dari dalam sumur bor ke permukaan. *Tubing* juga berfungsi sebagai pengantar dan penggantung *lifting equipment* dan *downhole tool* serta alat-alat kerja untuk *production casing*. Berdasarkan jenis logam (*steel grade*), *tubing* yang umum digunakan adalah *tubing* dengan *grade* J-55, N-80, K-75, P-110 dan lain-lain. Namun, yang sering diproses atau banyak digunakan adalah *grade* P110, N80, dan L80. (Sukandi, 2008)

Berdasarkan panjangnya, *tubing* dikategorikan menjadi tiga kelompok yaitu *Range I* dengan panjang 20 hingga 24 *feet*, *Range II* dengan panjang 28 hingga 32 *feet*, dan *Range III* dengan panjang 38 hingga 42 *feet*.

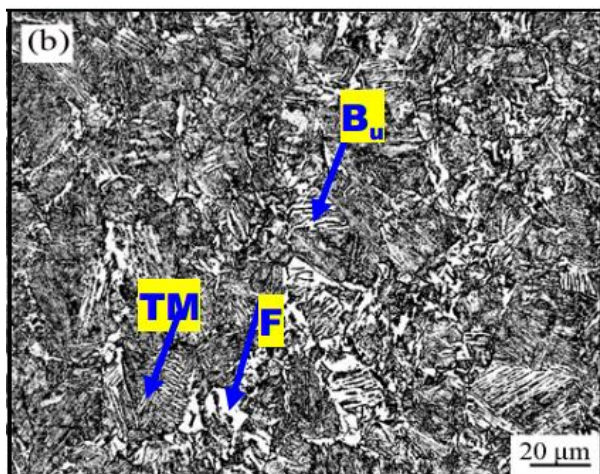
Tubing memiliki spesifikasi yang harus sesuai dengan komposisi kimia yang telah ditentukan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4.



Tabel 2.4 Komposisi Kimia *Tubing* N80 (Tianhan Xu, 2010)

Unsur	C	Si	Mn	P	S	Cr
wt%	0,38	0,23	1,38	0,015	0,076	0,023
Unsur	Mo	Ni	V	Ti	Cu	
wt%	0,021	0,003	0,006	0,003	0,007	

Struktur mikro N80 sebagian besar terdiri dari TM (*Tempered Martensite*). Matriksnya terdiri dari B_u (*Upper Bainite*), beberapa fasa F (*Ferrite*) dan TM. Sifat mekanik dari campuran F-B_u-TM mengontrol keseluruhan sifat mekanik material tersebut. Struktur mikro retakan pada permukaan mengandung *dimple*. Hal ini dikarenakan struktur mikronya sebagian besar terdiri dari TM, di mana *dimple* tersebut terbentuk dari karbida selama *tempering* pada martensit.



Gambar 2.6 Struktur Mikro Baja N80
(Tianhan Xu, 2010)



Tabel 2.5 Sifat Mekanik *Tubing* (U.S. Steel Tubular Products, 2014)

Grade	API N80 Q	N80 HC	N80 HP	API N80 Type I
Min. <i>Yield Strength</i> (10^3 psi)	80	80	95	80
Max. <i>Yield Strength</i> (10^3 psi)	110	110	110	110
Min. <i>Tensile Strength</i> (10^3 psi)	100	100	105	100

2.9 *Polyacrylamide*

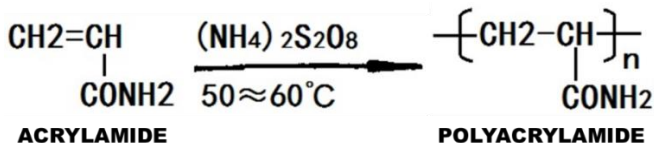
Polyacrylamide adalah polimer dengan monomer *acrylamide* yang terhubung dengan konfigurasi ikatan antara ujung-ujungnya dan berwujud padat seperti kaca pada temperatur kamar. Dikarenakan adanya perbedaan dalam metode pembuatannya, *polyacrylamide* yang dihasilkan dapat berupa *powder* berwarna putih, seperti manik-manik tembus cahaya, dan berlapis-lapis. Polimer ini memiliki densitas sebesar $1,302 \text{ g/cm}^3$ (23°C) dengan temperatur transisi gelas 153°C dan temperatur *softening* 210°C . *Polyacrylamide* memiliki stabilitas termal yang baik dan dapat larut dalam air. Larutan encernya jernih dan transparan dengan kenaikan viskositas seiring dengan peningkatan *molecular weight* polimer tersebut, dan juga memiliki hubungan logaritmik dengan perubahan konsentrasinya. Pada umumnya *polyacrylamide* tidak larut dalam pelarut organik kecuali asam asetat, asam akrilat, etilen glikol, gliserol, dan formamida.

Polyacrylamide terbentuk oleh polimerisasi radikal bebas monomer *acrylamide*. *Polyacrylamide* dapat dihasilkan dari beberapa metode seperti polimerisasi larutan, polimerisasi emulsi terbalik, polimerisasi suspensi, dan polimerisasi *solid state*. Produk yang dihasilkan harus memiliki berat molekul yang dapat dikontrol, sifat larut air yang baik, dan sedikit residual monomer.

Polyacrylamide merupakan polimer larut air dengan liontin golongan amida yang terdapat pada sambungan molekulnya. Golongan amida memiliki aktivitas kimia tinggi yang dapat membentuk rangkaian turunan dengan berbagai jenis senyawa.



Polyacrylamide dapat mengakibatkan flokulasi, pengentalan, *drag reduction*, adesif, stabilisasi koloid, pembentukan lapisan tipis (film), dan mencegah kerak. *Polyacrylamide* banyak digunakan pada pembuatan kertas, pertambangan, pemurnian batubara, metalurgi, pengeboran minyak, dan sektor industri lain serta merupakan bahan kimia yang penting untuk pengolahan air.



Gambar 2.7 Struktur *Polyacrylamide*
(Book, 2017)

2.9.1 Sifat Kimia

Polyacrylamide relatif stabil terhadap panas dan padatnya hanya dapat melunak pada 220-230°C. Larutannya menunjukkan perubahan yang signifikan hanya pada 110°C di atasnya. *Polyacrylamide* tidak larut pada benzena, toluena, silena, bensin, minyak tanah, solar, tetapi larut dalam air. *Polyacrylamide* dapat bereaksi dengan alkali melalui hidrolisis parsial. *Polyacrylamide* akan mengalami reaksi imidisasi pada asam kuat ($\text{pH} \leq 2,5$) yang akan mengurangi kelarutannya dalam air. *Polyacrylamide* dapat dihubungkan secara *cross-link* oleh ion kompleks *poly-nuclear* yang dibentuk antara aldehida (seperti formaldehida) dan logam kuat (seperti aluminium, kromium, zirkonium, dan sebagainya) dan mudah terdegradasi oleh perilaku mekanik dan/atau oksigen. Pada pengeboran minyak, *polyacrylamide* sebagian besar digunakan sebagai agen pemindah minyak, agen penghalang air, agen pengontrol profil, pengental, agen *drag-reducing*, dan agen pengolahan air.

2.9.2 Sifat Fisik

Polyacrylamide mudah larut dalam air dingin membentuk larutan adesif transparan dengan pengadukan yang cepat.



Polyacrylamide memiliki kelarutan lebih dari 1% pada pelarut seperti gliserol, etilen glikol, formaldehida, asam asetat, dan asam laktat. Akan tetapi, *polyacrylamide* hanya dapat mengembang tanpa larut dalam pelarut seperti asam propionat, etilen glikol; *polyacrylamide* juga tidak dapat larut pada pelarut seperti aseton dan heksana.

Polyacrylamide memiliki sifat higroskopis sedang. Jika tidak terpapar temperatur tinggi, *powder polyacrylamide* dapat disimpan dalam jangka panjang. Untuk cairan *polyacrylamide*, ketika konsentrasinya lebih dari 17%, maka dapat disimpan selama lebih dari satu tahun tanpa perubahan signifikan pada viskositas larutan.

Pada konsentrasi yang biasa digunakan, *polyacrylamide* dapat tercampur dengan baik pada sebagian besar resin alami atau sintetis, sistem lateks, dan sebagian besar garam. *Polyacrylamide* juga dapat dengan cepat tercampur dengan surfaktan non-ionik, kationik, dan anionik, meskipun beberapa surfaktan mempengaruhi viskositas.

Viskositas larutan *polyacrylamide* berbanding lurus dengan berat molekulnya. Peningkatan berat molekul *polyacrylamide* akan menyebabkan peningkatan viskositas intrinsik. Semakin tinggi temperatur, semakin rendah viskositasnya.

Gugus karboksil dalam rantai panjang menghasilkan *polyacrylamide* anionik; gugus amin menghasilkan jenis kationik. Dikarenakan adanya gugus amin atau gugus karboksil dalam rantai panjangnya, *polyacrylamide* mudah berflokulasi saat bertemu ion aluminium.

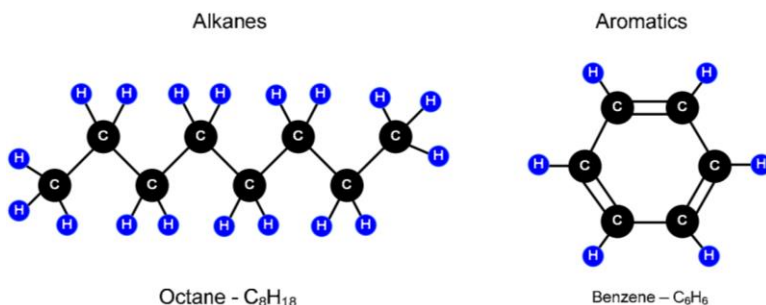
Polyacrylamide bersifat non-toksik, tetapi jika mengandung monomer terpolimerisasi (ikatan rangkap), dapat berakibat toksik pada manusia. Oleh karena itu, setelah selesai preparasi harus ditambahkan sejumlah natrium bikarbonat untuk menghilangkan monomer residu.



2.10 Minyak Mentah dan Gas Alam

2.10.1 Minyak Mentah

Minyak mentah adalah campuran kompleks yang terdiri dari 200 atau lebih senyawa organik berbeda, sebagian besar alkana (hidrokarbon ikatan tunggal dengan rumus molekul C_nH_{n+2}) dan pecahan aromatik lebih kecil (molekul cincin enam rantai seperti benzena C_6H_6).



Gambar 2.8 Hidrokarbon Dasar
(Devold, 2013)

Semakin tinggi derajat API (fraksi berdasarkan American Petroleum Institute) pada minyak mentah, maka akan semakin encer (lebih ringan dan tipis). Semakin rendah derajat API, maka akan semakin kental (lebih berat dan tebal). Derajat API minyak mentah biasanya berkisar antara 7 sampai 52, sekitar 97 kg/m^3 sampai 750 kg/m^3 . Minyak mentah yang lebih ringan mengandung jumlah karbon lebih sedikit sehingga molekulnya lebih pendek.

2.10.2 Gas Alam

Gas alam hampir seluruhnya terdiri dari metana. Gas alam yang berasal dari sumur minyak biasanya disebut *associated gas*. Gas ini bisa terpisah dari minyak dalam *formation (free gas)* atau dilarutkan dalam minyak mentah (*dissolved gas*). Gas alam dari sumur gas dan kondensat yang tidak mengandung atau hanya sedikit mengandung minyak mentah disebut *nonassociated gas*.



Sumur gas biasanya hanya menghasilkan gas alam mentah. Namun, sumber kondensat menghasilkan gas alam bebas bersama dengan hidrokarbon kondensat *semi-liquid*. Setelah dipisahkan dari minyak mentah, gas alam biasanya bercampuran dengan hidrokarbon lainnya, terutama etana, propana, butana, dan pentana. Selain itu, gas alam mentah mengandung uap air, hidrogen sulfida (H_2S), karbon dioksida, helium, nitrogen, dan senyawa lainnya.

2.10.3 Kondensat

Hidrokarbon yang dikenal sebagai *natural gas liquids* (NGL) bisa jadi produk sampingan yang sangat berharga dari pengolahan gas alam. NGL meliputi etana, propana, butana, isobutana, dan natural gasolin. Material-material ini dijual secara terpisah dan memiliki berbagai kegunaan yang berbeda-beda, seperti bahan baku untuk kilang minyak atau pabrik petrokimia, sebagai sumber energi, dan untuk meningkatkan *recovery* di sumur minyak. Kondensat juga berfungsi sebagai pengencer minyak mentah yang kental.

2.11 Model Matematika pada Kebocoran Pipa Vertikal

Untuk meneliti aliran *multiphase* dari minyak bumi dan gas alam pada kebocoran pipa vertikal, digunakan model tiga dimensi dan non-homogen untuk campuran fluida. Pada permodelan matematika, indeks α merepresentasikan fasa minyak kontinu dan indeks β merepresentasikan fasa gas.

Persamaan umum yang digunakan pada kasus ini yaitu:

1. Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial(f_{\alpha}\rho_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \cdot (f_{\alpha}\rho_{\alpha}U_{\alpha}) = 0, \quad \dots (2.1)$$

$$\frac{\partial(f_{\beta}\rho_{\beta})}{\partial t} + \nabla \cdot (f_{\beta}\rho_{\beta}U_{\beta}) = 0, \quad \dots (2.2)$$

di mana:

f = fraksi volume

ρ = densitas



$\mathbf{U} = (u, v, w)$ vektor kecepatan

Masing-masing sesuai dengan fasa yang ada.

2. Persamaan momentum

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(f_\alpha \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha \otimes \mathbf{U}_\alpha)] \\ &= -f_\alpha \nabla p' + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_{\text{eff}, \alpha} \left[\nabla \mathbf{U}_\alpha + (\nabla \mathbf{U}_\alpha)^\top \right] \right\} + \mathbf{S}_{M\alpha} + \mathbf{D}, \dots \quad (2.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(f_\beta \rho_\beta \mathbf{U}_\beta)}{\partial t} + \nabla \cdot [f_\beta (\rho_\beta \mathbf{U}_\beta \otimes \mathbf{U}_\beta)] \\ &= -f_\beta \nabla p' + \nabla \cdot \left\{ f_\beta \mu_{\text{eff}, \beta} \left[\nabla \mathbf{U}_\beta + (\nabla \mathbf{U}_\beta)^\top \right] \right\} + \mathbf{S}_{M\beta} - \mathbf{D}, \dots \quad (2.4) \end{aligned}$$

di mana:

p' = tekanan modifikasi

μ_{eff} = viskositas efektif

\mathbf{S}_M = momentum asal akibat gaya eksternal (ketika ada pengaruh gaya gravitasi)

\mathbf{D} = gaya geser yang terjadi antarfasa, dapat dimodelkan sebagai:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{8} C_D \rho_\alpha A |\mathbf{U}_\beta - \mathbf{U}_\alpha| (\mathbf{U}_\beta - \mathbf{U}_\alpha), \quad \dots \quad (2.5)$$

di mana:

C_D = koefisien geser

A = densitas area *interface*

Untuk $Re < 1000$, koefisien geser dimodelkan berdasarkan model Schiller-Naumann:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \quad \dots \quad (2.6)$$

Dan untuk $Re \geq 1000$, koefisien geser dianggap 0,44 di mana Re merepresentasikan bilangan Reynolds partikel, yang dimodelkan sebagai:

$$Re = \frac{\rho_\alpha |\mathbf{U}_\beta - \mathbf{U}_\alpha| d_\beta}{\mu_\alpha}, \quad \dots \quad (2.7)$$



di mana

d_β = diameter partikel

Densitas area *interface* (A) dimodelkan dengan persamaan:

$$A = \frac{6f_\beta}{d_\beta}; \quad \dots (2.8)$$

3. Persamaan energi kinetik

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{U}_m k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{C_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho_m \varepsilon. \quad (2.9)$$

di mana:

ρ_m = densitas

k = energi kinetik

\mathbf{U}_m = vektor kecepatan

μ_m = viskositas

μ_t = viskositas turbulen

P_k = produksi turbulen

ε = *Turbulence Eddy Dissipation*

2.12 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik dengan basis komputasi untuk memecahkan permasalahan dalam bidang *engineering*. Geometri akan dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil di mana masing-masing elemen *node* yang digunakan untuk mewakili nilai variabel (contohnya temperatur, tegangan, dan perpindahan panas) yang membawahi elemen fungsi interpolasi (disebut juga fungsi aproksimasi).

Nilai nodal dari variabel lapangan dimasukkan pada persamaan sistem. Nilai nodal yang tidak diketahui dari masalah akan diperoleh dengan menyelesaikan persamaan sistem. Masalah teknik yang umum ditangani oleh metode elemen hingga antara lain adalah struktural, termal, aliran fluida, listrik, magnet, kebisingan akustik, dan sebagainya.

Metode elemen hingga digunakan untuk memecahkan masalah dan kode komersial ANSYS. ANSYS merupakan sebuah



software berbasis *finite element methods* yang dapat digunakan untuk analisis distribusi tegangan, temperatur, elektromagnetik, dan sebagainya (Esen, Inalli, & Esen, 2009).

2.13 Komputasi Dinamika Fluida

Komputasi dinamika fluida atau yang biasa dikenal sebagai *computational fluid dynamics* (CFD) memberikan prediksi kualitatif (dan terkadang bahkan kuantitatif) pada aliran fluida dalam model matematika (persamaan diferensiasi parsial), peralatan *software* (*solvers*, *pre-* dan *post-processing*), dan metode numerik (teknik diskretisasi dan solusi).

Metode diskretisasi persamaan transport yang pada umumnya diterapkan dalam kode CFD adalah Finite Volume Method (FVM). Pada FVM, domain komputasi dibagi menjadi kontrol volume dan prinsip konservasi yang diterapkan pada setiap kontrol volume. Penggunaan FVM juga memungkinkan penggunaan *unstructured grids* yang menurunkan waktu komputasi.



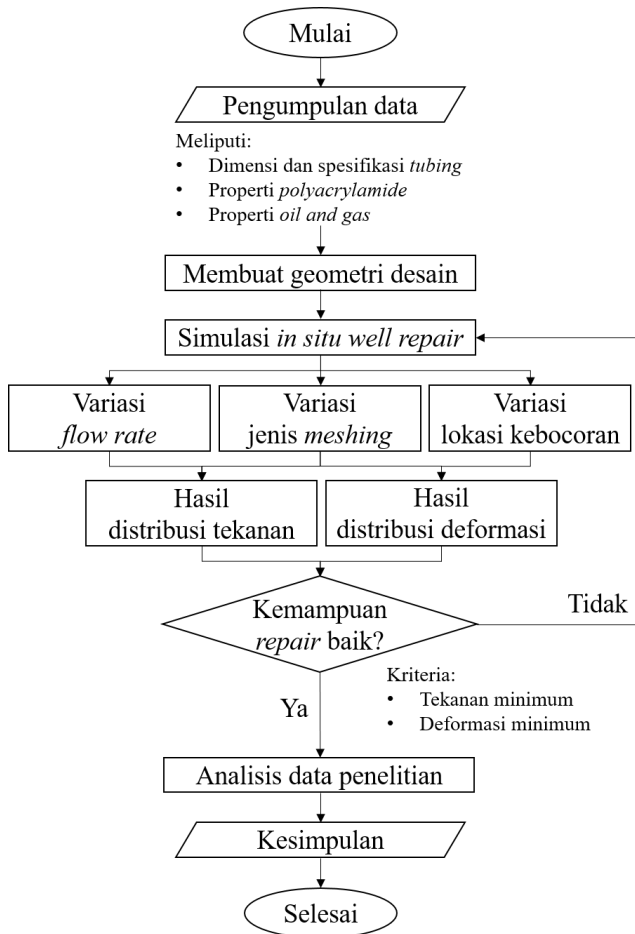
(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



3.2 Material Penelitian

3.2.1 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah *tubing grade N80* berdasarkan standar API 5CT tentang *Specification for Casing and Tubing* dengan spesifikasi yang ditunjukkan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi Material *Tubing N80* (API 5. , 2005)

Parameter	Nilai
Densitas	8030 kg/m ³
Total Elongasi Selama Pembebanan	0,5%
Minimum <i>Yield Strength</i>	552 MPa
Maksimum <i>Yield Strength</i>	758 MPa
Minimum <i>Tensile Strength</i>	689 MPa
Modulus Young	207.000 MPa
<i>Specific Heat</i>	502,48 J/kg.K
<i>Thermal Conductivity</i>	16,27 W/m.K
<i>Heat Transfer Coefficient</i>	150 W/m ² .K

Material penambal (*patching*) yang digunakan adalah polimer jenis *polyacrylamide* dengan sifat seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Sifat Material *Polyacrylamide* (Book, 2017)

Parameter	Nilai
Densitas	1189 kg/m ³
<i>Tensile Strength</i>	1220e+003 Pa
<i>Elongation Break</i>	900%
Modulus Young	7111 Pa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,48
<i>Specific Heat</i>	3810 J/kg.K
<i>Thermal Conductivity</i>	0,56 W/m.K

Fluida yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak bumi (*crude oil*) dan gas alam (*natural gas*) dengan sifat-sifat seperti ditunjukkan pada Tabel 3.3.



Tabel 3.3 Sifat *Crude Oil* dan *Natural Gas* (Devold, 2013)

<i>Crude Oil</i>	
Parameter	Nilai
Densitas	960 kg/m ³
<i>Specific Heat</i>	1880 J/kg.K
<i>Thermal Conductivity</i>	0,12 W/m.K
Viskositas	0,048 kg/ms
<i>Molecular Weight</i>	258,19 kg/kmol
<i>Natural Gas</i>	
Parameter	Nilai
Densitas	0,6679 kg/m ³
<i>Standard State Enthalpy</i>	-7,489518e+07 J/kmol
<i>Thermal Conductivity</i>	0,0332 W/m.K
Viskositas	1,087e-05 kg/m.s
<i>Molecular Weight</i>	16,04303 kg/kmol

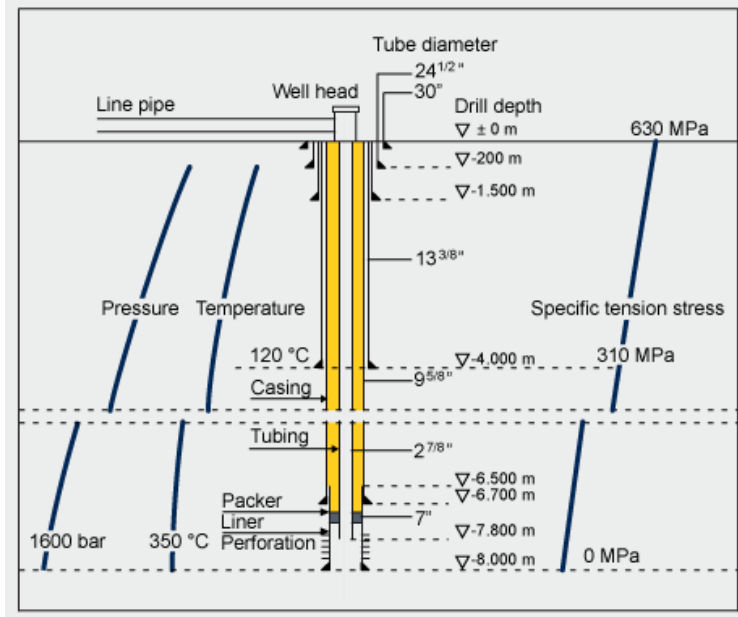
Kondisi normal fluida dan *tubing* pada saat dilakukan operasi permodelan dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Kondisi Operasi Fluida dan *Tubing*

Parameter	Nilai
Temperatur	373 K
Tekanan absolut	101325 Pa
<i>Flow rate</i>	1000 bpd
Percepatan gravitasi	-9,81 m/s ²

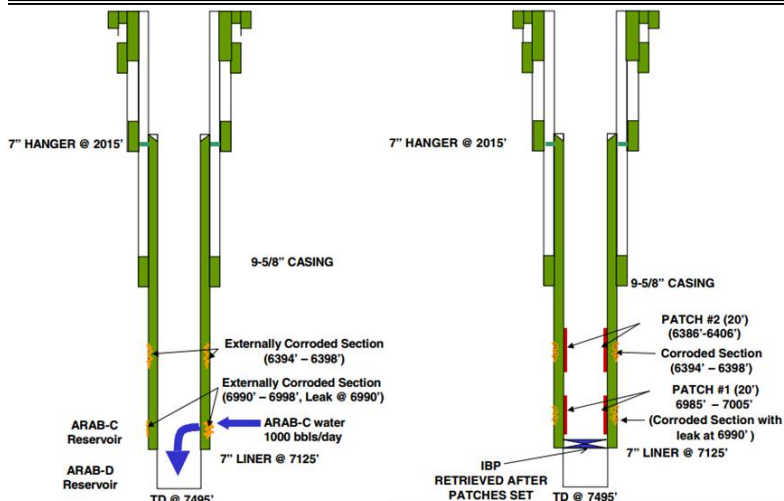
3.2.2 Geometri Penelitian

Skema sumur produksi yang digunakan pada penelitian ini yaitu sumur bor yang di dalamnya terdapat *injection tubing* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema Sumur Produksi
(U.S. Steel Tubular Products, 2014)

Selanjutnya, *tubing* pada sumur tersebut diasumsikan mengalami kebocoran sehingga perlu dilakukan adanya *patch repair* secara *in situ* dengan menggunakan material *polyacrylamide* yang diinjeksikan ke dalam *tubing*.



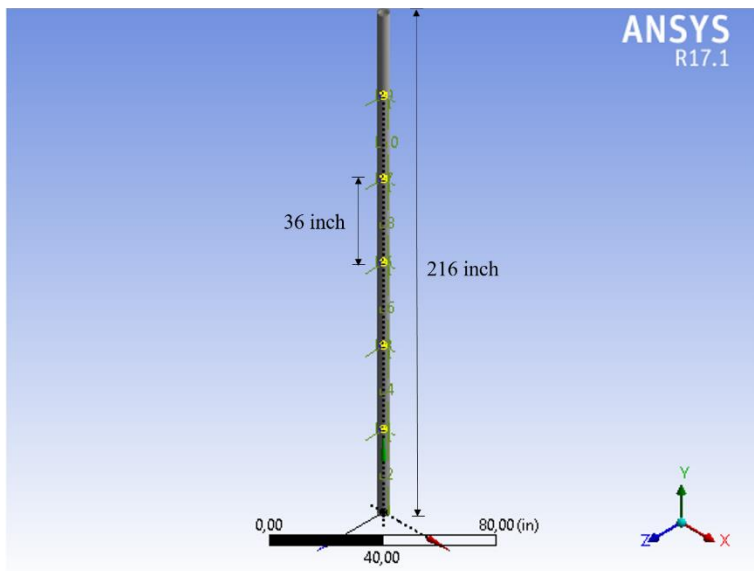
Gambar 3.3 Skema Kebocoran *Tubing* (a) Sebelum *Repair* dan
(b) Setelah *Repair*
(Styler, Al-Suwailem, Akhnoukh, & Leighton, 2001)

Geometri yang digunakan pada penelitian ini berupa *tubing* produksi berbentuk silinder dengan lima lubang paralel yang terletak sejajar di sisi depan. Dimensi pipa dan lubang ditunjukkan pada Tabel 3.5 berikut.

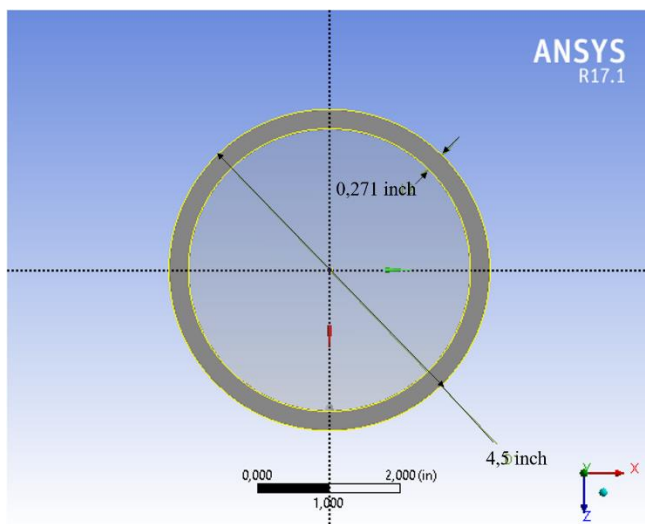
Tabel 3.5 Dimensi Geometri Penelitian

Dimensi	Nilai
Panjang pipa	216 inch
Diameter luar pipa	4,5 inch
Diameter dalam pipa	4,229 inch
Ketebalan pipa	0,271 inch
Diameter lubang	0,15 inch
Jarak antar lubang	36 inch

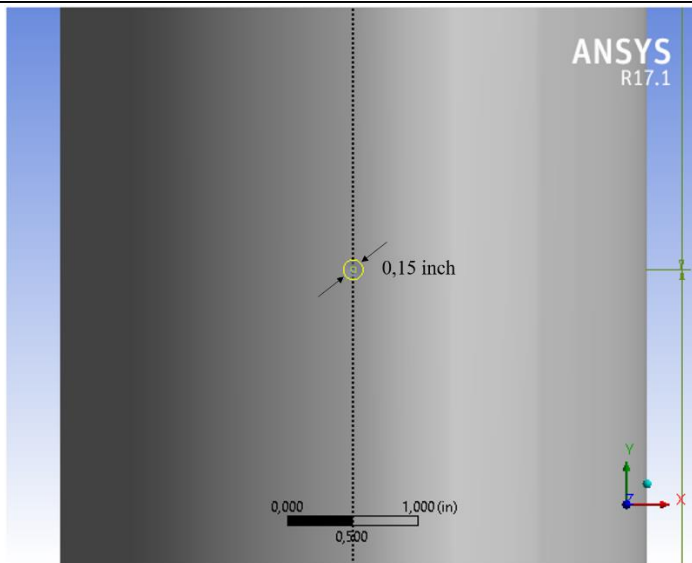
Secara detail, geometri pipa produksi ditunjukkan pada Gambar 3.4 sampai Gambar 3.7 berikut.



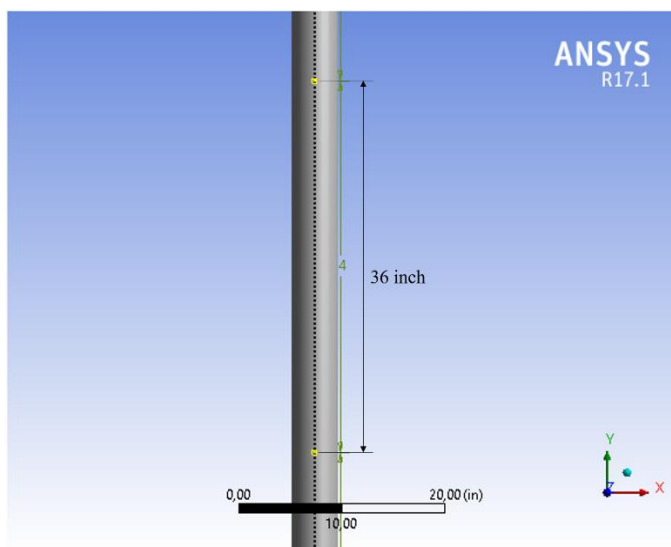
Gambar 3.4 Geometri Pipa Penelitian



Gambar 3.5 Diameter dan Ketebalan Pipa



Gambar 3.6 Diameter Lubang



Gambar 3.7 Jarak antar Lubang



3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan untuk penelitian tugas akhir ini berupa perangkat lunak (*software*) berbasis metode elemen hingga, yaitu ANSYS modul Workbench 17.1 dengan rincian sebagai berikut:

1. Design Modeler, digunakan untuk membuat geometri dan selanjutnya geometri disempurnakan menggunakan Mechanical APDL.
2. Meshing [ANSYS ICEM CFD], digunakan untuk melakukan proses *meshing*.
3. Fluent, digunakan untuk memodelkan kecepatan fluida sehingga diperoleh nilai tekanan pada area lubang kebocoran.
4. Mechanical [ANSYS Multiphysics], digunakan untuk memodelkan deformasi pada *tubing* dan area *patching polyacrylamide* yang diakibatkan oleh tekanan.

3.4 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan variabel-variabel antara lain:

1. Variabel bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi *flow rate*, sensitivitas *meshing*, serta kedalaman lokasi kebocoran.

Flow rate pada proses pengeboran minyak berkisar antara 1000 hingga 1200 barrel per hari/barrel per *day* (bpd). Sehingga dapat divariasikan pengaruh *flow rate* sebesar 1000 bpd, 1050 bpd, 1100 bpd, 1150 bpd, dan 1200 bpd.

Jenis *meshing* yang digunakan adalah *meshing* kasar, medium, dan halus. Berikut merupakan detail ukuran *meshing* minimum, jumlah *node* dan jumlah elemen pada ketiga jenis *meshing* yang digunakan untuk menganalisis sensitivitas yang ditimbulkan.



Tabel 3.6 Detail *Meshing*

Jenis <i>Meshing</i>	Minimum <i>Meshing</i>	Jumlah <i>Node</i>	Jumlah Elemen
Kasar	2,74 mm	18845	87925
Medium	1,37 mm	22380	106996
Halus	0,80 mm	26511	129241

Lokasi kebocoran yang digunakan pada permodelan ini adalah pada kedalaman 36 inch, 72 inch, 108 inch, 144 inch, dan 180 inch dari dasar sambungan *tubing*. Posisi kedalaman lokasi kebocoran tersebut divariasikan untuk mengetahui nilai tekanan pada daerah kebocoran dengan kedalaman yang berbeda.

2. Variabel terikat

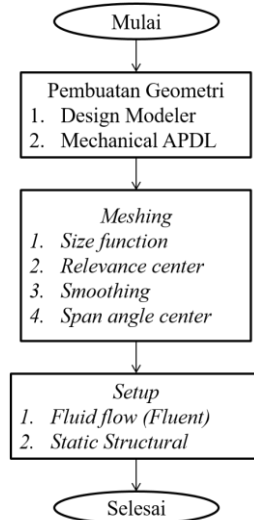
Variabel terikat yang akan diamati dalam penelitian ini adalah kontur tekanan pada lokasi *in situ well repair* yang dihasilkan berdasarkan input kecepatan untuk menghasilkan kemampuan mengatasi kebocoran *tubing* paling optimum.

3. Variabel kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah geometri dan properti *tubing*, sifat material *polyacrylamide*, serta karakteristik fluida.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur permodelan yang dilakukan pada penelitian tugas akhir ini ditunjukkan pada diagram alir Gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.8 Diagram Alir Permodelan

3.5.1 Pembuatan Geometri

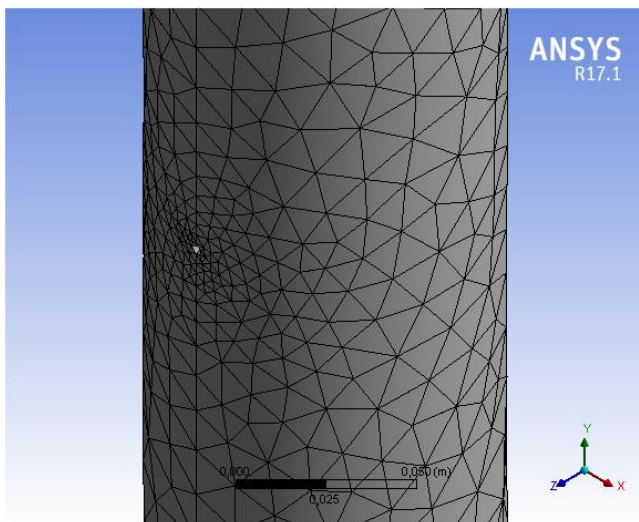
Pembuatan geometri *tubing* dilakukan dengan menggunakan aplikasi Design Modeler pada ANSYS. Selanjutnya, geometri tersebut akan disempurnakan menggunakan Mechanical APDL untuk menyatukan bagian-bagian yang masih terpisah dari geometri Design Modeler.

3.5.2 Meshing

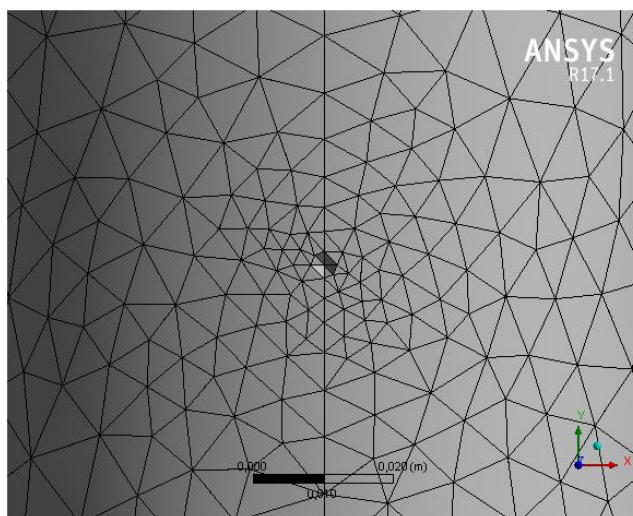
Meshing dilakukan dengan membagi benda menjadi elemen-elemen lebih kecil yang nantinya akan dilakukan permodelan simulasi distribusi tekanan akibat pengaruh kecepatan. Digunakan tiga variasi *meshing*, yaitu *meshing* kasar, medium, dan halus untuk mengetahui pengaruh sensitivitas *meshing* terhadap distribusi *flow rate* dan tekanan yang dihasilkan.



1. *Meshing* kasar



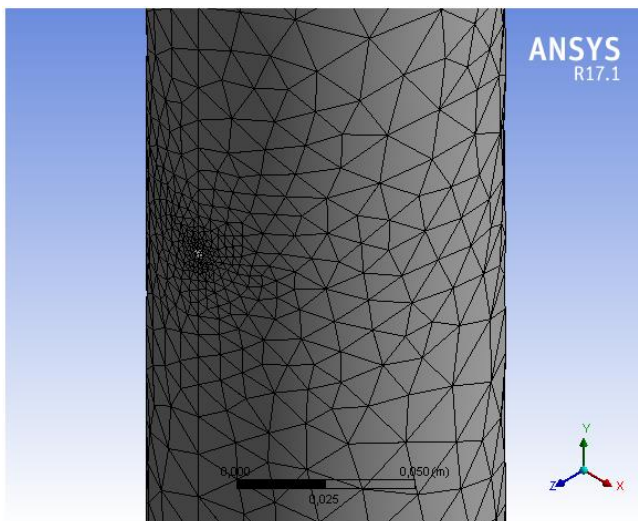
Gambar 3.9 *Meshing* Kasar pada *Tubing*



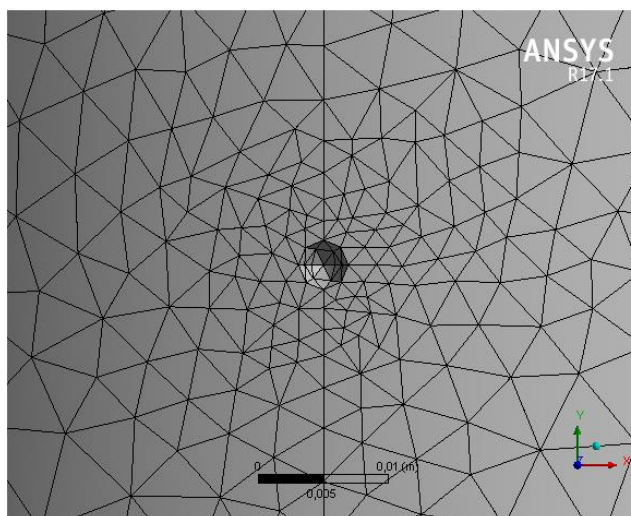
Gambar 3.10 Detail *Meshing* Kasar pada Lubang



2. *Meshing medium*



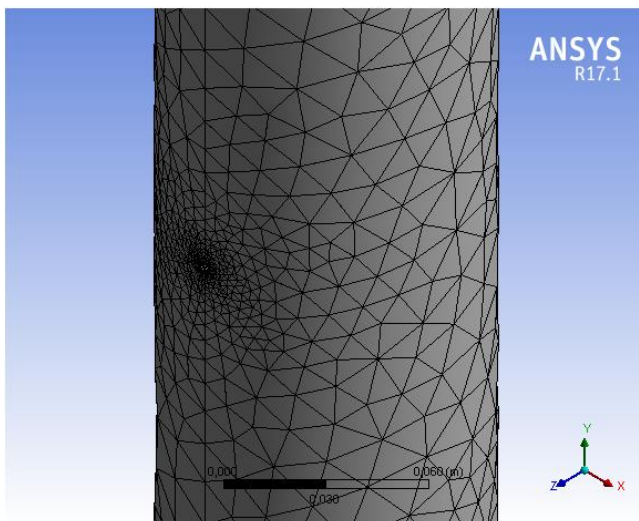
Gambar 3.11 *Meshing Medium* pada *Tubing*



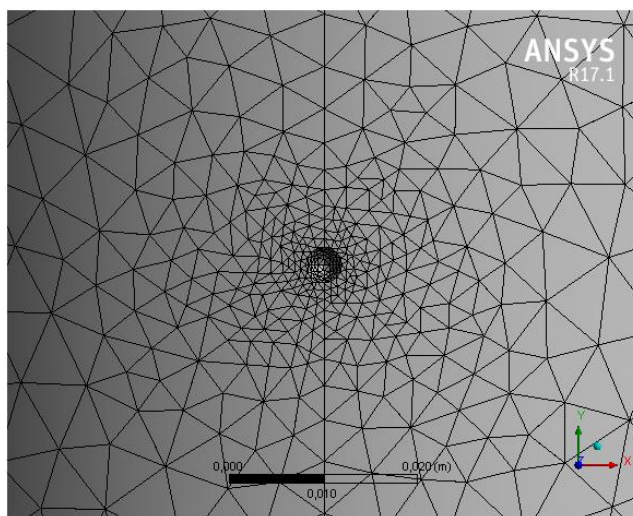
Gambar 3.12 *Detail Meshing Medium* pada *Lubang*



3. *Meshing* halus



Gambar 3.13 *Meshing* Halus pada *Tubing*



Gambar 3.14 Detail *Meshing* Halus pada Lubang

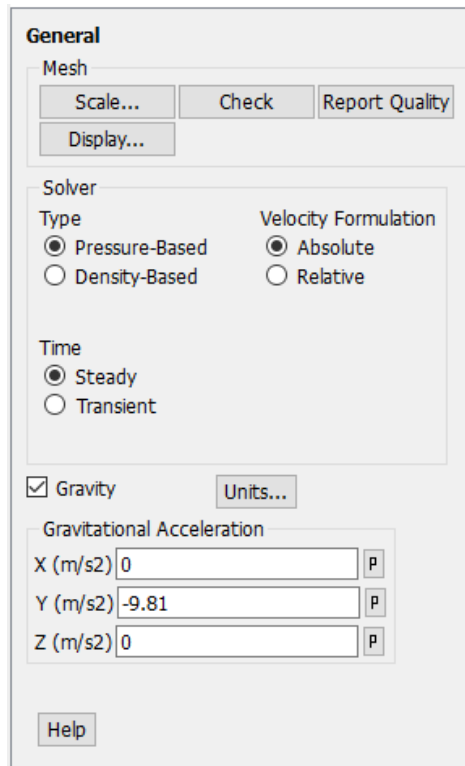


3.5.3 Setup

Setup yang dilakukan terdiri dari dua bagian, yaitu proses *setup* fluida pada Fluent dan *setup structural* pada Mechanical [ANSYS Multiphysics].

1. Fluent

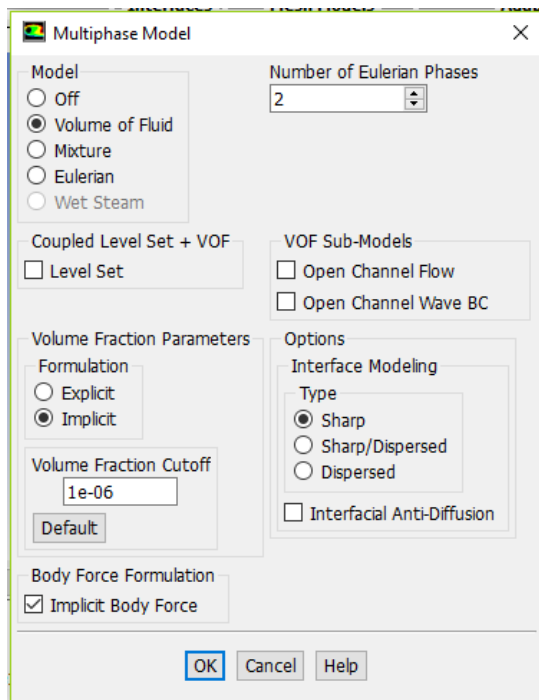
Untuk menganalisis fluida yang dilakukan menggunakan ANSYS Fluent, pertama-tama melakukan *general setup* untuk pengecekan proses *meshing*. Selanjutnya, memilih jenis *Solver*, yaitu tipe *pressure-based*, dengan *velocity formulation* secara *absolute*, dan pemilihan waktu secara *steady*. Percepatan gravitasi yang terjadi sepanjang sumbu-y adalah $-9,81 \text{ m/s}^2$.



Gambar 3.15 *Fluent General Setup*



Setelah itu, melakukan pemilihan model *multiphase* secara *volume of fluid* karena ada dua jenis fluida yang disimulasikan yaitu minyak bumi (*crude oil*) dan gas alam (*natural gas*). Aliran pada fluida diasumsikan terjadi secara laminar.



Gambar 3.16 *Multiphase Model*

Langkah selanjutnya yaitu memilih tipe *boundary condition* yang akan disimulasikan. Pada bagian *inlet*, dipilih tipe input berupa *velocity inlet*. Pada kondisi ini, nilai *flow rate* pada proses pengeboran berdasarkan data-data yang telah dikumpulkan akan dikonversikan ke dalam bentuk kecepatan sebagai input untuk menjalankan proses simulasi. Hasil yang akan diamati pada *outlet* yaitu berupa *pressure outlet*.

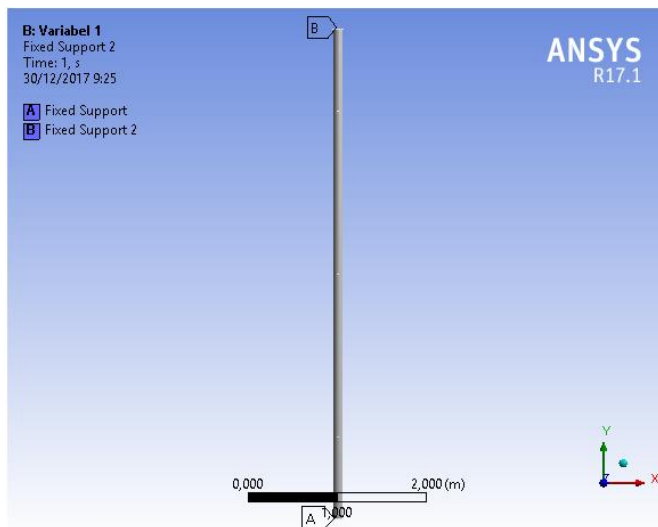


Setelah proses simulasi selesai dilakukan, diperoleh nilai *result* berupa distribusi tekanan relatif sepanjang geometri *tubing* yang akan menunjukkan adanya fenomena kehilangan tekanan (*pressure drop*).

2. Mechanical [ANSYS Multiphysics]

Untuk menganalisis *structural* yang dilakukan menggunakan Mechanical [ANSYS Multiphysics], pertama-tama melakukan pengaturan *engineering data* berdasarkan sifat mekanik material yang sesuai. Dengan mengetahui nilai densitas, modulus elastisitas, dan Poisson's *ratio*, maka *software* akan secara otomatis menghitung nilai *bulk modulus*, *shear modulus*, *tensile-yield strength*, *compressive yield strength*, dan *tensile ultimate strength*. Dalam penelitian ini, material *structural* yang digunakan pada *tubing* yaitu *structural steel*. Sedangkan material yang digunakan pada *patch* yaitu *polyacrylamide*.

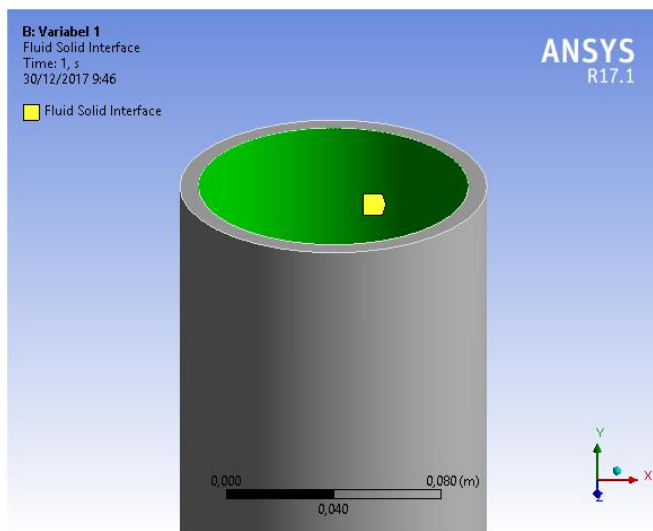
Selanjutnya, menentukan daerah *fixed support* yang terletak di kedua ujung tubing untuk menahan pengaruh gaya dan momen agar tetap stabil.



Gambar 3.17 *Fixed Support*



Setelah itu, menentukan daerah *fluid-solid interface* yang terletak di dinding *tubing* bagian dalam untuk menentukan *interface* antara *tubing* dan fluida sehingga dapat dilakukan proses *imported load* berupa tekanan yang sebelumnya telah disimulasikan pada fluida menggunakan Fluent.



Gambar 3.18 *Fluid-Solid Interface*

Setelah proses simulasi selesai dilakukan, diperoleh nilai *result* berupa total deformasi yang diperoleh sepanjang geometri *tubing* dan *patch* akibat pembebanan tekanan yang diberikan.

3.6 Langkah Penelitian

Penelitian yang dilakukan terdiri dari beberapa tahapan sebagai berikut.

1. Pengumpulan data dan studi literatur

Pada tahapan ini, data-data berupa ukuran geometri dan sifat mekanik *tubing* tipe N80, sifat material *polyacrylamide* sebagai material penambal kebocoran, serta sifat-sifat minyak bumi



(*crude oil*) dan gas alam (*natural gas*) sebagai fluida yang diteliti dikumpulkan untuk selanjutnya diolah pada simulasi.

2. Pembuatan geometri

Tahapan selanjutnya adalah pembuatan geometri dengan menggunakan Design Modeler. Pembuatan geometri terlebih dahulu dilakukan dengan membuat pipa struktur yang kemudian dilubangi secara paralel. Selanjutnya, lubang tersebut diisi dengan material *polyacrylamide* sebagai penambal kebocoran dan terakhir dilakukan pengisian dengan fluida di dalamnya.

3. Permodelan dengan *software*

Tahapan ketiga pada penelitian ini adalah permodelan dengan menggunakan ANSYS Workbench 17.1. Penelitian ini dilakukan dengan analisis *flow rate* dan tekanan pada geometri *tubing*.

4. Analisis data penelitian

Dari hasil pembebanan tekanan akibat kecepatan yang diberikan, akan menimbulkan respon berupa deformasi. Dari respon tersebut dapat dianalisis kemampuan *in situ well repair* paling optimum untuk mengatasi kebocoran *tubing* dengan kriteria deformasi minimum yang ditimbulkan.

5. Kesimpulan

Tahapan terakhir yang dilakukan adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis data penelitian. Kesimpulan akan diperoleh berdasarkan tujuan yang ada pada subbab 1.3. penelitian dapat dikatakan selesai setelah didapatkan kesimpulan.



BAB IV

HASIL DATA DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, fluida diasumsikan merupakan minyak bumi dan gas alam yang dapat tercampur secara sempurna yang mengalir pada *tubing* N80 secara vertikal ke atas dari dasar tubing yang didefinisikan sebagai *inlet*. Spesifikasi jenis fluida dan *tubing* N80 telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

Fluida diasumsikan bersifat Newtonian (memiliki viskositas konstan pada suhu tertentu), *incompressible* (tidak dapat dimampatkan), isothermal (memiliki temperatur konstan sepanjang *tubing*), serta memiliki sifat fisik dan kimia konstan (Hermadi, 2010). Aliran fluida tersebut diasumsikan berada pada kondisi *steady state*.

Kecepatan fluida divariasikan berdasarkan nilai *flow rate* pada proses pengeboran. Variasi ini dilakukan untuk mengetahui respon tekanan terhadap kemampuan *patch repair* menggunakan polimer *superabsorbent* jenis *polyacrylamide* serta menganalisis *flow rate* dan tekanan yang menghasilkan kemampuan *in situ well repair* paling optimum. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini yaitu penurunan tekanan sepanjang aliran fluida serta deformasi pada *patch* dan *tubing*.

Permodelan ini dimulai dengan membuat geometri *tubing* sesuai dimensi berdasarkan standar. Lalu disimulasikan aliran fluida pada sepanjang *tubing*. Hasil yang diperoleh setelah melakukan *solving* pada Fluent yaitu distribusi tekanan pada dinding dalam *patch* yang berbatasan dengan fluida. Untuk mengetahui deformasi yang terjadi, maka dilakukan analisis struktural menggunakan Mechanical Static Structural dengan mentransfer pembebanan tekanan pada *interface* antara fluida dan *tubing*.

4.1 Analisis Pengaruh Flow Rate 1000 bpd

Pada variasi *flow rate* sebesar 1000 bpd akan dianalisis pengaruhnya terhadap *pressure drop* dan deformasi yang terjadi.



Analisis tersebut dilakukan masing-masing pada hasil *meshing* kasar, medium, dan halus.

4.1.1 Pressure Drop

Tabel 4.1 berikut menunjukkan nilai tekanan akibat pengaruh *flow rate* sebesar 1000 bpd yang ditimbulkan pada masing-masing sensitivitas *meshing* diukur dari bagian dasar sambungan *tubing*.

Tabel 4.1 Nilai Tekanan pada *Flow Rate* 1000 bpd

Lokasi	<i>Meshing</i> Kasar	<i>Meshing</i> Medium	<i>Meshing</i> Halus
0 inch	251,1 Pa	250,1 Pa	252,8 Pa
36 inch	190,7 Pa	189,3 Pa	191,3 Pa
72 inch	151,7 Pa	150,9 Pa	152,2 Pa
108 inch	113,1 Pa	112,6 Pa	113,5 Pa
144 inch	75,21 Pa	73,86 Pa	75,01 Pa
180 inch	36,93 Pa	35,81 Pa	36,82 Pa
216 inch	-0,815 Pa	-1,057 Pa	-0,855 Pa

Berdasarkan Tabel 4.1 tersebut, dapat diketahui bahwa tekanan relatif pada sensitivitas *meshing* yang berbeda akan menghasilkan nilai yang berbeda pula. Tekanan awal akibat pengaruh *flow rate* sebesar 1000 bpd memiliki nilai yang hampir sama, yaitu sebesar 251,1 Pa; 250,1 Pa; dan 252,8 Pa untuk masing-masing *meshing* kasar, medium, dan halus. Nilai tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu signifikan karena hanya berselisih antara 1 sampai 2 Pa.

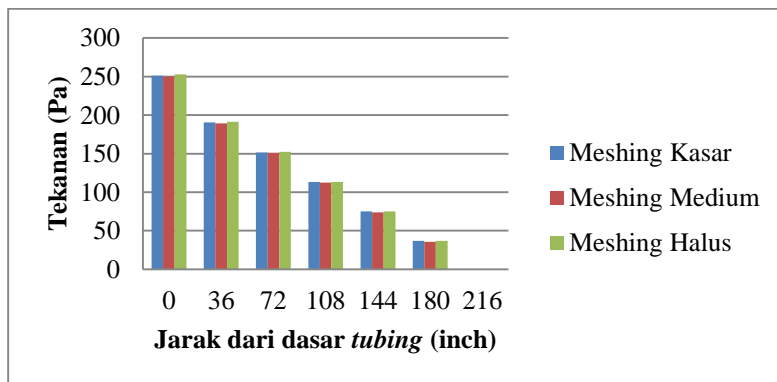
Pada ujung atas *tubing* dengan lokasi 216 inch, nilai tekanan yang negatif menunjukkan bahwa tekanan absolutnya adalah sebesar 1 atmosfer dikurangi nilai negatif dari tekanan relatif. Sehingga, tekanan ujung atas *tubing* pada *meshing* kasar yaitu sebesar $(10^5 - 0,815)$ Pa, pada *meshing* medium yaitu sebesar $(10^5 - 1,057)$ Pa, dan pada *meshing* halus yaitu sebesar $10^5 - 0,855)$ Pa.



Dari data tersebut, pengaruh *flow rate* paling besar terjadi pada *meshing* halus, yaitu sebesar 252,8 Pa pada lokasi awal terjadinya aliran fluida. Selanjutnya terjadi *pressure drop* sepanjang geometri *tubing* yang hampir sama pada ketiga jenis sensitivitas *meshing*.

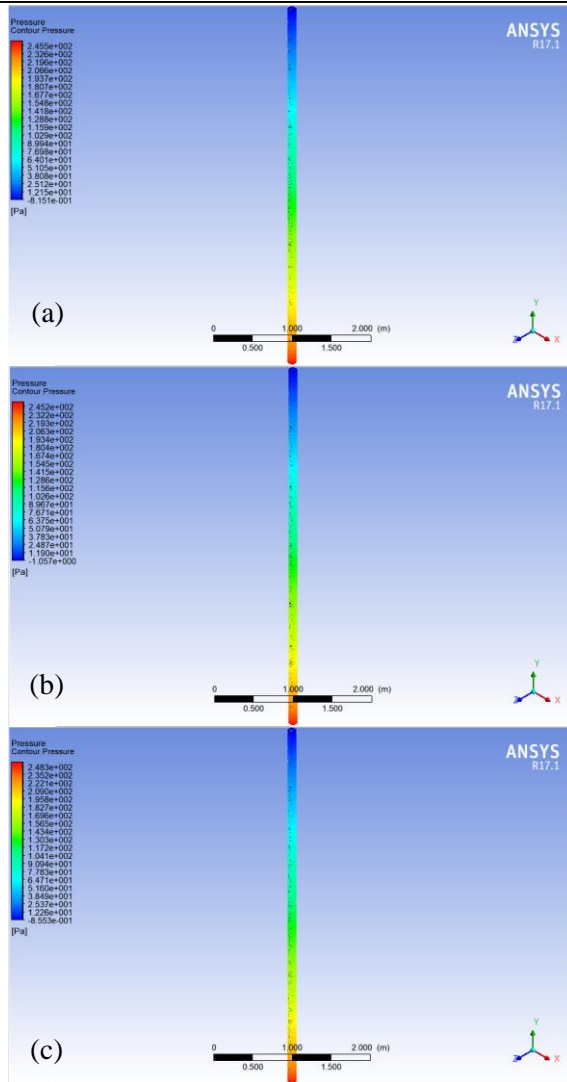
Meskipun demikian, nilai *pressure drop* paling besar akibat pengaruh *flow rate* 1000 bpd terjadi pada geometri dengan *meshing* halus. Hal tersebut menunjukkan bahwa *meshing* halus memiliki sensitivitas paling tinggi terhadap input *flow rate* yang diberikan. Sehingga akan mengakibatkan ketelitian yang tinggi pada nilai yang dihasilkan. Sesuai dengan pernyataan yang dikemukakan Bangun (2010), bahwa nilai kualitas kekasaran permukaan pada *meshing* menunjukkan ketelitian dan kepekaan geometri terhadap input yang diberikan.

Grafik *pressure drop* pada masing-masing sensitivitas *meshing* ditunjukkan pada grafik dalam Gambar 4.1 berikut.

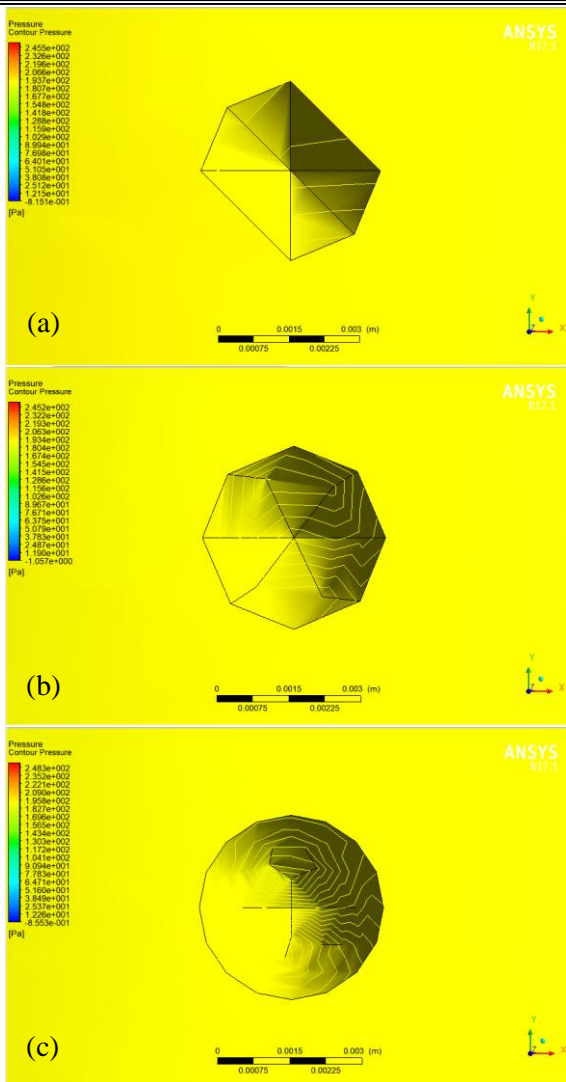


Gambar 4.1 *Pressure Drop* pada *Flow Rate* 1000 bpd

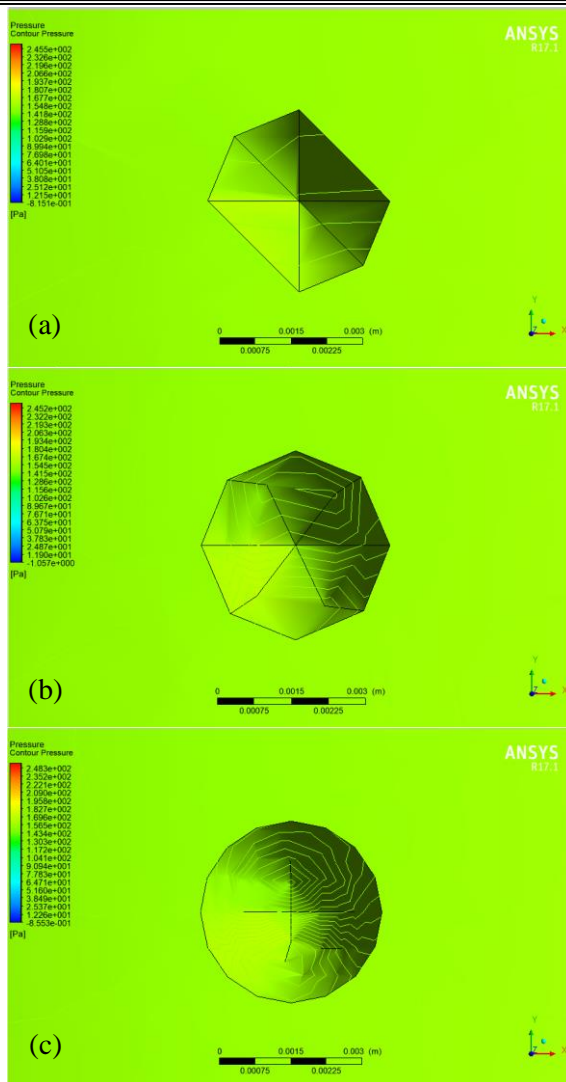
Berikut merupakan hasil distribusi tekanan di setiap lubang dengan lokasi dan jenis *meshing* yang berbeda pada *flow rate* 1000 bpd.



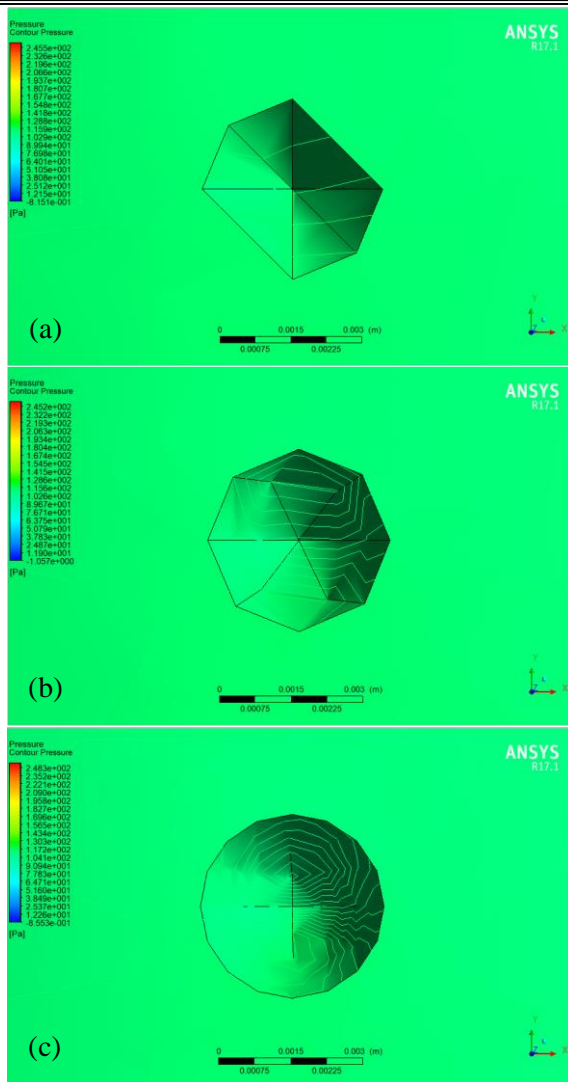
Gambar 4.2 Distribusi Tekanan Sepanjang *Tubing* dengan *Flow Rate* 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



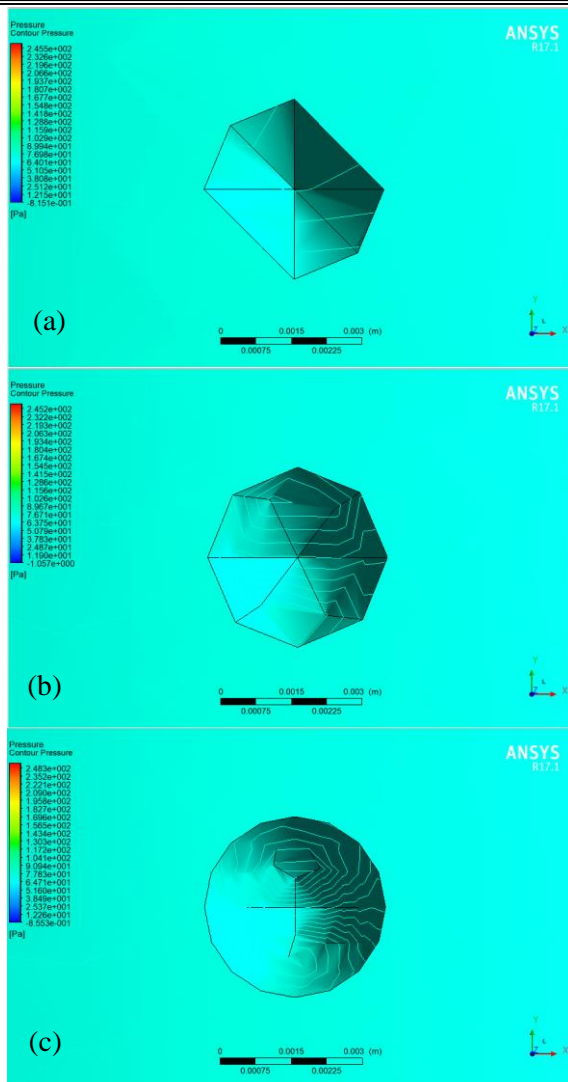
Gambar 4.3 Distribusi Tekanan pada *Patch* Pertama dengan *Flow Rate* 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



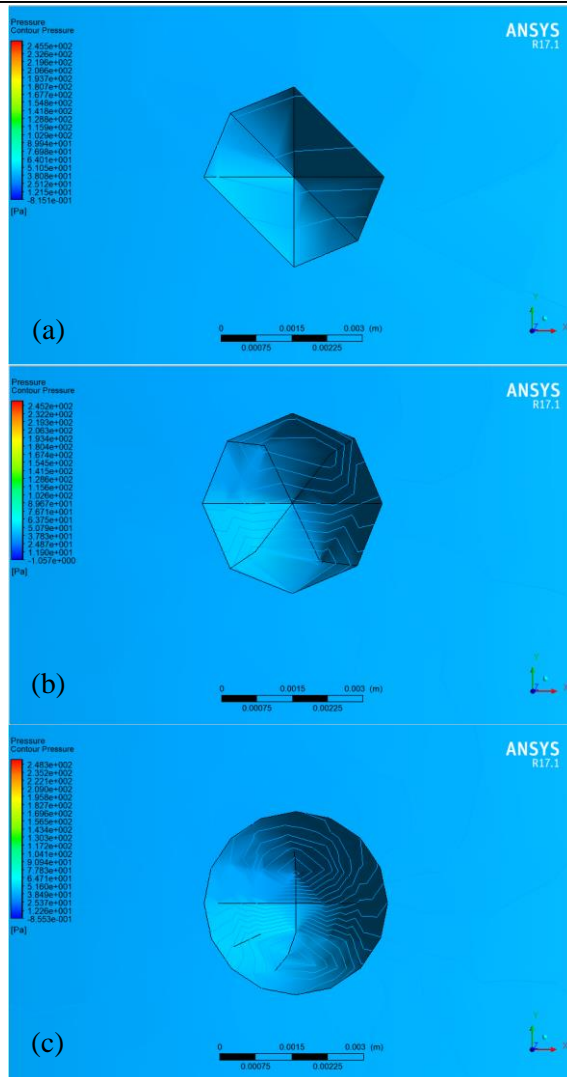
Gambar 4.4 Distribusi Tekanan pada *Patch* Kedua dengan *Flow Rate* 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.5 Distribusi Tekanan pada *Patch* Ketiga dengan *Flow Rate* 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.6 Distribusi Tekanan pada *Patch* Keempat dengan *Flow Rate* 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.7 Distribusi Tekanan pada Patch Kelima dengan Flow Rate 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



4.1.2 Deformasi

Tabel 4.2 berikut menunjukkan nilai deformasi yang dihasilkan akibat pengaruh pembebanan tekanan yang diberikan sepanjang geometri *tubing* pada masing-masing sensitivitas *meshing* diukur berdasarkan *fixed support* pada ujung-ujung sambungan *tubing*.

Tabel 4.2 Deformasi pada *Flow Rate* 1000 bpd

Lokasi	<i>Meshing</i> Kasar (m)	<i>Meshing</i> Medium (m)	<i>Meshing</i> Halus (m)
0 inch	0	0	0
36 inch	1,6999e-008	4,2889e-009	8,4992e-009
72 inch	4,2683e-008	1,2599e-008	2,1584e-008
108 inch	5,1119e-008	1,9256e-008	2,7525e-008
144 inch	3,5787e-008	1,5344e-008	1,9538e-008
180 inch	1,2697e-008	5,8058e-009	6,9191e-009
216 inch	0	0	0

Berdasarkan pembebanan tekanan yang diberikan akibat pengaruh *flow rate* sepanjang geometri *tubing*, dapat diketahui bahwa deformasi paling besar terjadi pada jarak 108 inch dari dasar *tubing* pada geometri masing-masing variasi *meshing*. Nilai deformasi yang ditimbulkan yaitu sebesar 5,1119e-008 m untuk *meshing* kasar, 1,9256e-008 m untuk *meshing* medium, dan 2,7525e-008 m untuk *meshing* halus.

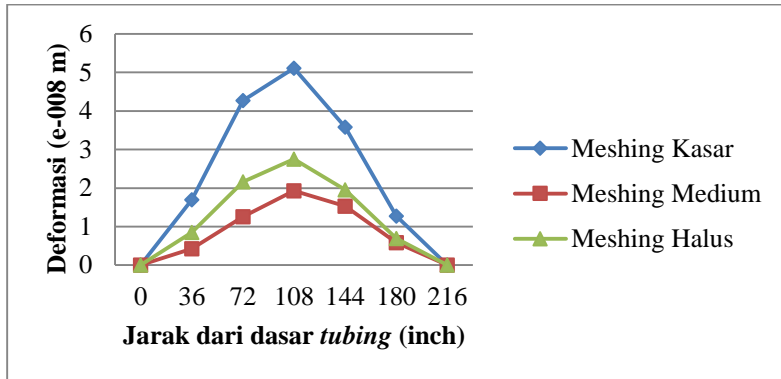
Hal tersebut diakibatkan karena *patch* yang terletak pada jarak 108 inch merupakan lokasi terjauh dari *fixed support* ujung sambungan atas maupun bawah. Meskipun tekanan yang terjadi pada daerah tersebut tidak sebesar tekanan pada dasar *tubing* yang merupakan lokasi awal terjadinya aliran fluida, tetapi kemampuan geometri dalam menahan pengaruh pembebanan yang diberikan tidak cukup kuat sehingga deformasi terjadi secara maksimum.

Pada ujung bawah sambungan *tubing* yang disebut sebagai lokasi 0 inch dan ujung atas sambungan *tubing* yang disebut sebagai lokasi 216 inch, deformasi yang terjadi yaitu sebesar 0 atau



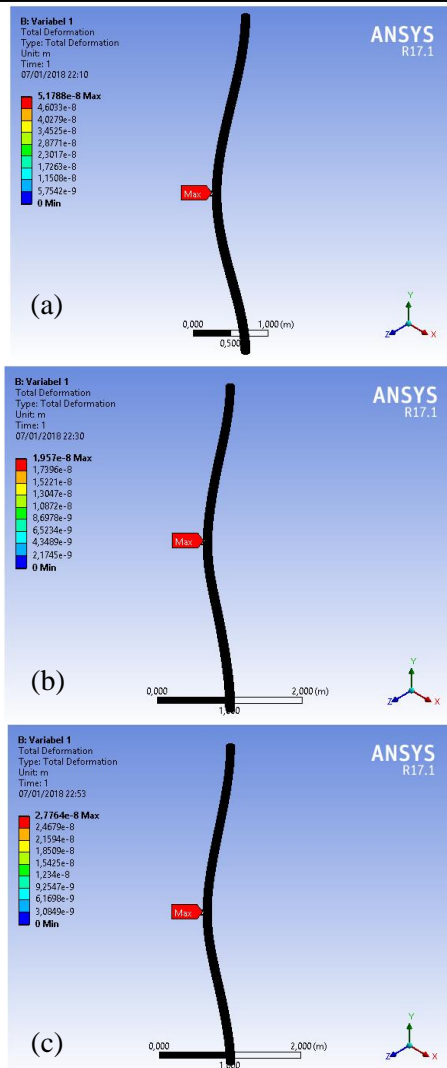
dapat dikatakan tidak terjadi deformasi. Hal tersebut karena ujung atas dan ujung bawah sambungan *tubing* merupakan lokasi di mana *fixed support* diterapkan.

Distribusi deformasi yang terjadi dapat dilihat pada grafik dalam Gambar 4.8 berikut.

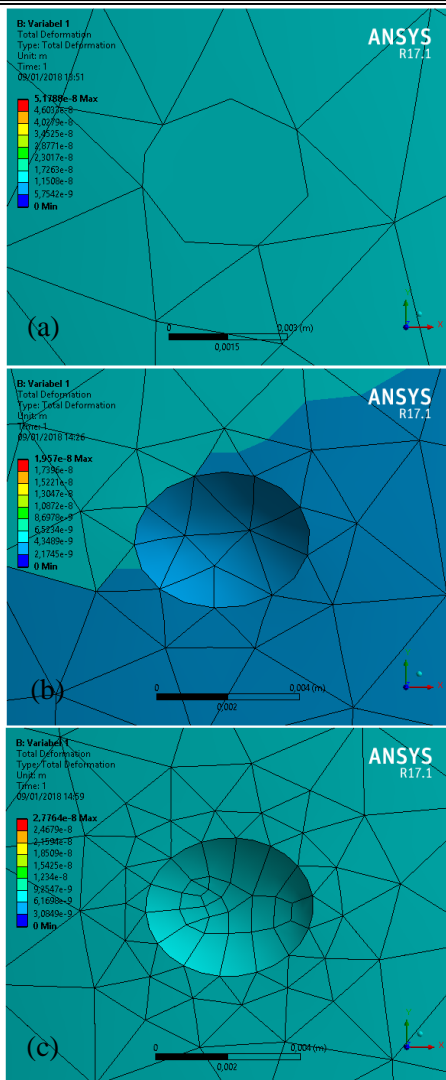


Gambar 4.8 Deformasi pada *Flow Rate* 1000 bpd

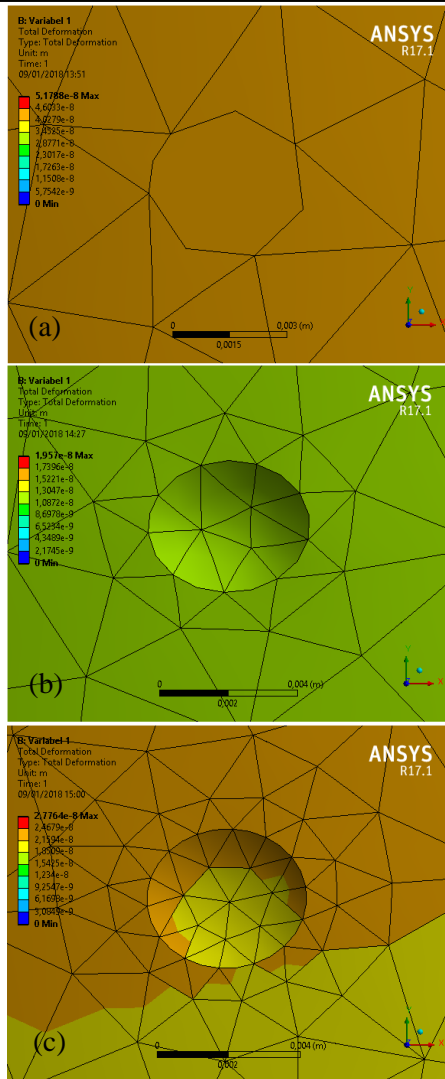
Berikut merupakan hasil deformasi di setiap lubang dengan lokasi dan jenis *meshing* yang berbeda pada *flow rate* 1000 bpd.



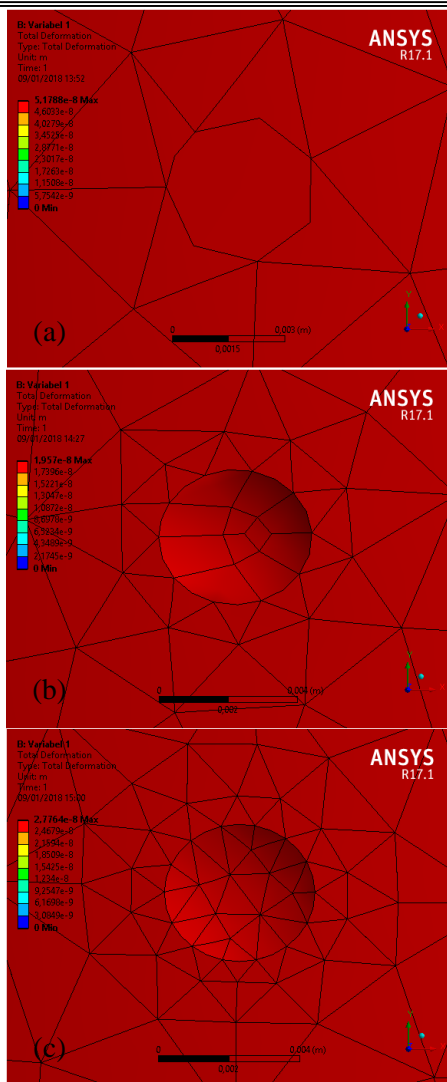
Gambar 4.9 Deformasi Sepanjang Tubing dengan Flow Rate 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



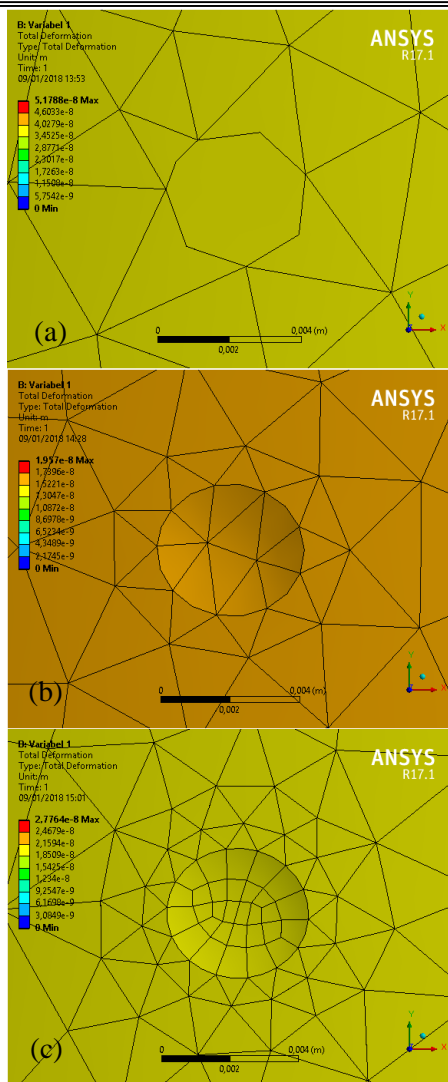
Gambar 4.10 Deformasi pada *Patch* Pertama dengan *Flow Rate* 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



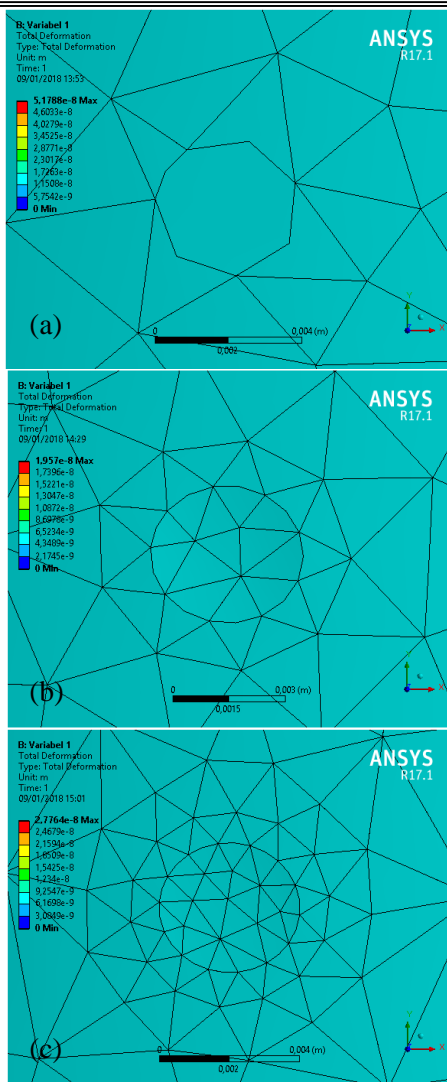
Gambar 4.11 Deformasi pada Patch Kedua dengan *Flow Rate* 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.12 Deformasi pada Patch Ketiga dengan Flow Rate 1000 bpd, pada (a) meshing kasar, (b) meshing medium, dan (c) meshing halus



Gambar 4.13 Deformasi pada *Patch* Keempat dengan *Flow Rate* 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.14 Deformasi pada *Patch* Kelima dengan *Flow Rate* 1000 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



4.2 Analisis Pengaruh *Flow Rate* 1050 bpd

Pada variasi *flow rate* sebesar 1050 bpd akan dianalisis pengaruhnya terhadap *pressure drop* dan deformasi yang terjadi. Analisis tersebut dilakukan masing-masing pada hasil *meshing* kasar, medium, dan halus.

4.2.1 *Pressure Drop*

Tabel 4.3 berikut menunjukkan nilai tekanan akibat pengaruh *flow rate* sebesar 1050 bpd yang ditimbulkan pada masing-masing sensitivitas *meshing* diukur dari bagian dasar sambungan *tubing*.

Tabel 4.3 Nilai Tekanan pada *Flow Rate* 1050 bpd

Lokasi	<i>Meshing</i> Kasar	<i>Meshing</i> Medium	<i>Meshing</i> Halus
0 inch	266,0 Pa	264,9 Pa	267,7 Pa
36 inch	201,6 Pa	199,9 Pa	202,1 Pa
72 inch	160,3 Pa	159,3 Pa	160,7 Pa
108 inch	119,4 Pa	118,8 Pa	119,8 Pa
144 inch	79,38 Pa	77,90 Pa	79,17 Pa
180 inch	38,96 Pa	37,72 Pa	38,81 Pa
216 inch	-0,915 Pa	-1,149 Pa	-0,929 Pa

Berdasarkan Tabel 4.3 tersebut, dapat diketahui bahwa tekanan relatif pada sensitivitas *meshing* yang berbeda akan menghasilkan nilai yang berbeda pula. Tekanan awal akibat pengaruh *flow rate* sebesar 1050 bpd memiliki nilai yang hampir sama, yaitu sebesar 266,0 Pa; 264,9 Pa; dan 267,7 Pa untuk masing-masing *meshing* kasar, medium, dan halus. Nilai tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu signifikan karena hanya berselisih antara 2 sampai 3 Pa.

Pada ujung atas *tubing* dengan lokasi 216 inch, nilai tekanan yang negatif menunjukkan bahwa tekanan absolutnya adalah sebesar 1 atmosfer dikurangi nilai negatif dari tekanan relatif. Sehingga, tekanan ujung atas *tubing* pada *meshing* kasar yaitu

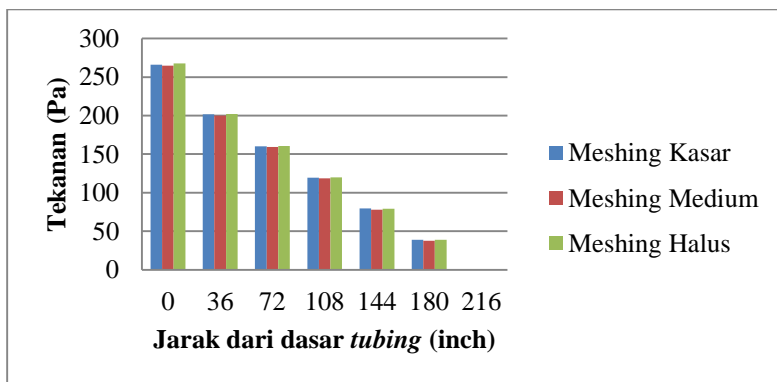


sebesar ($10^5 - 0,915$) Pa, pada *meshing* medium yaitu sebesar $10^5 - 1,149$) Pa, dan pada *meshing* halus yaitu sebesar ($10^5 - 0,929$) Pa.

Dari data tersebut, pengaruh *flow rate* paling besar terjadi pada *meshing* halus, yaitu sebesar 267,7 Pa pada lokasi awal terjadinya aliran fluida. Selanjutnya terjadi *pressure drop* sepanjang geometri *tubing* yang hampir sama pada ketiga jenis sensitivitas *meshing*.

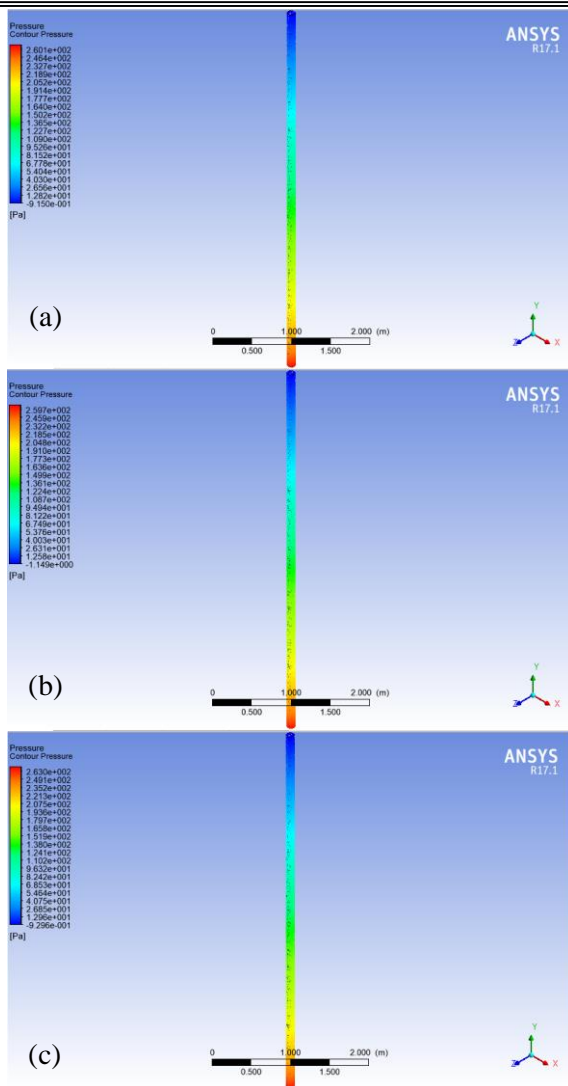
Meskipun demikian, nilai *pressure drop* paling besar akibat pengaruh *flow rate* 1050 bpd terjadi pada geometri dengan *meshing* halus. Hal tersebut menunjukkan bahwa *meshing* halus memiliki sensitivitas paling tinggi terhadap input *flow rate* yang diberikan. Sehingga akan mengakibatkan ketelitian yang tinggi pada nilai yang dihasilkan. Sesuai dengan pernyataan yang dikemukakan Bangun (2010), bahwa nilai kualitas kekasaran permukaan pada *meshing* menunjukkan ketelitian dan kepekaan geometri terhadap input yang diberikan.

Grafik *pressure drop* pada masing-masing sensitivitas *meshing* ditunjukkan pada grafik dalam Gambar 4.15 berikut.

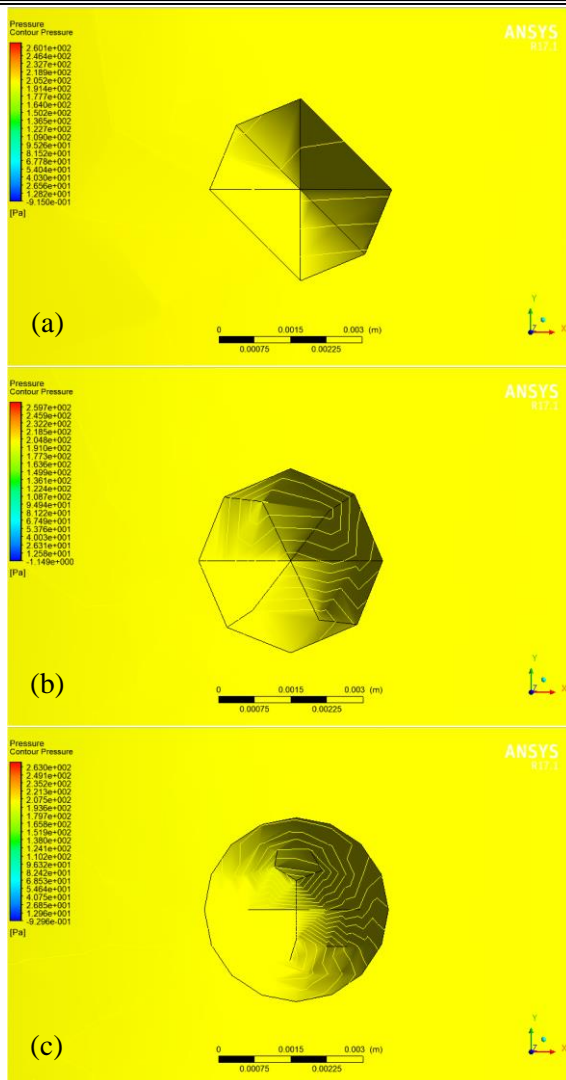


Gambar 4.15 *Pressure Drop* pada *Flow Rate* 1050 bpd

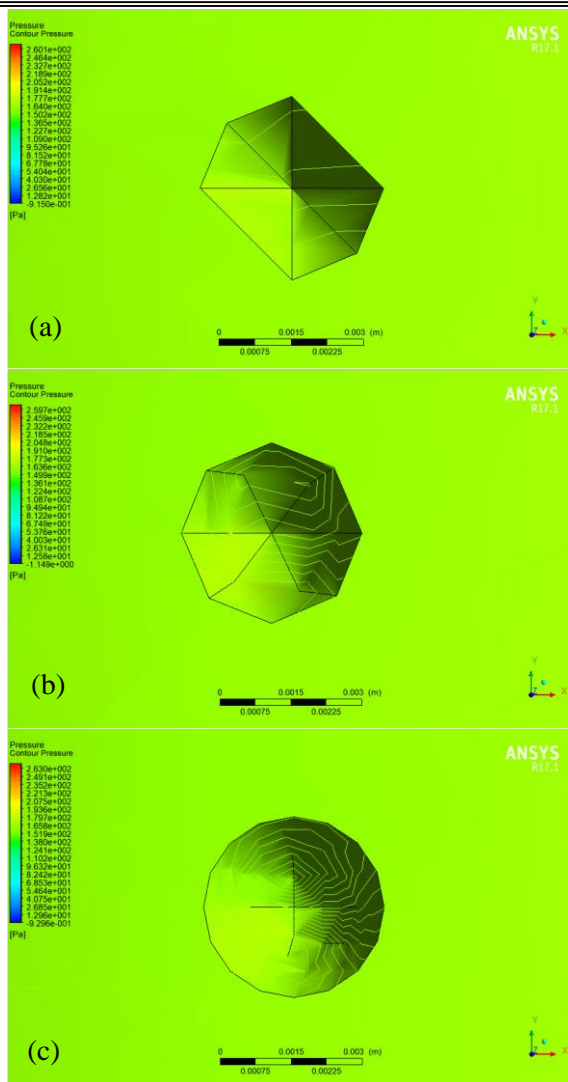
Berikut merupakan hasil distribusi tekanan di setiap lubang dengan lokasi dan jenis *meshing* yang berbeda pada *flow rate* 1050 bpd.



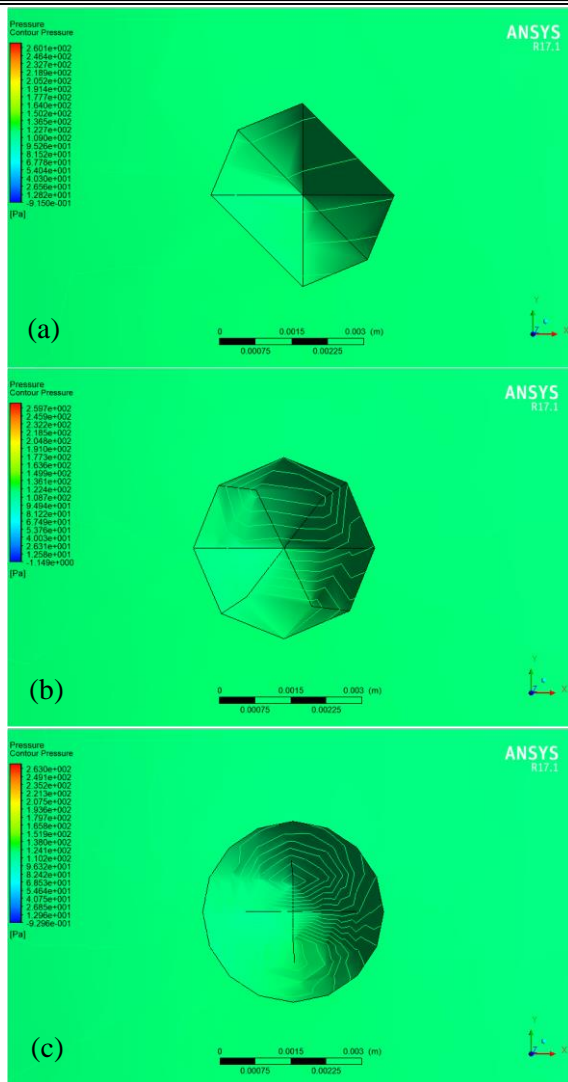
Gambar 4.16 Distribusi Tekanan Sepanjang *Tubing* dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



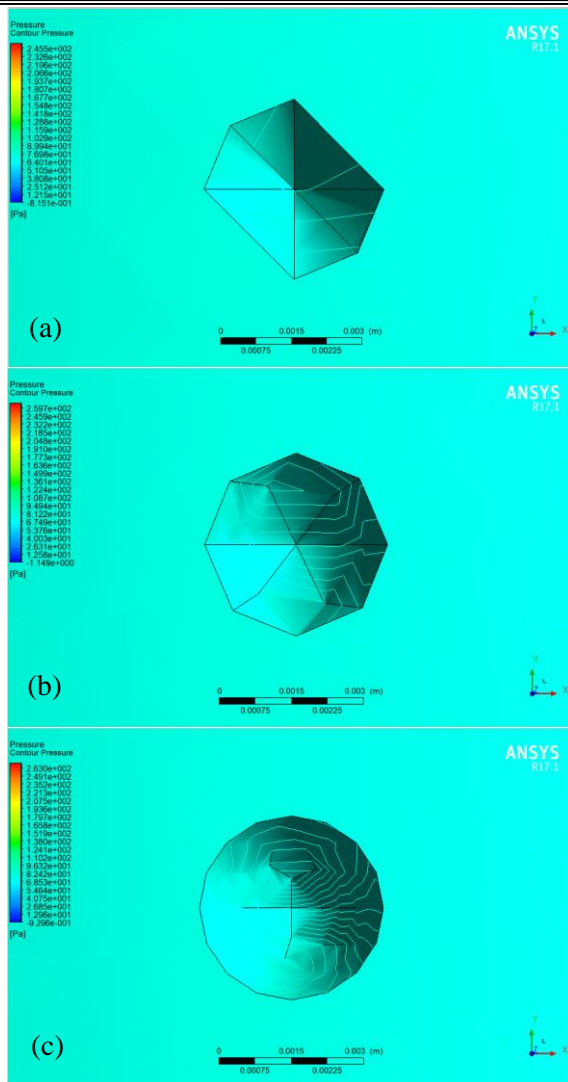
Gambar 4.17 Distribusi Tekanan pada *Patch* Pertama dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



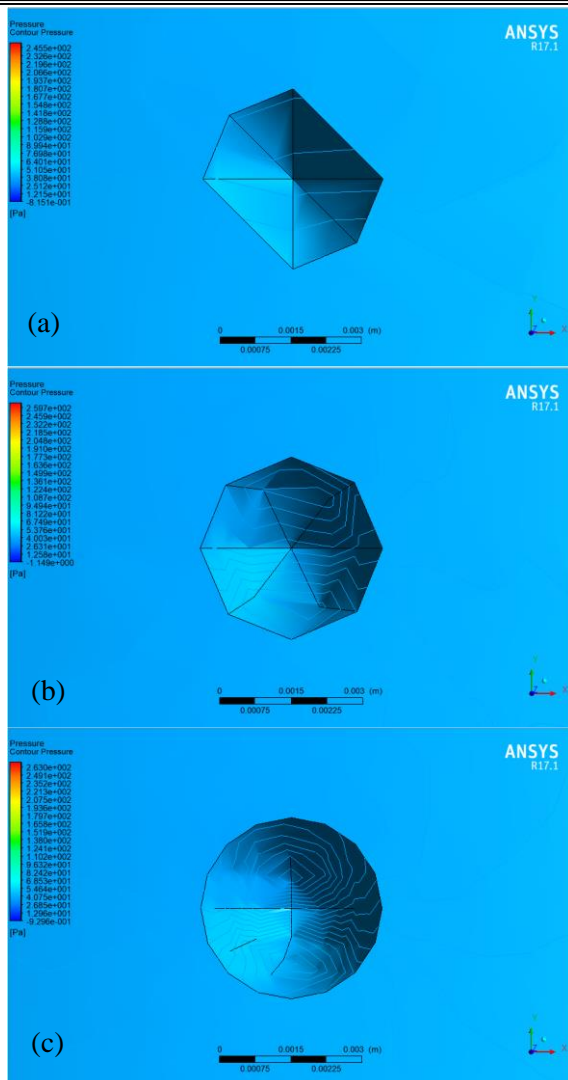
Gambar 4.18 Distribusi Tekanan pada *Patch* Kedua dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.19 Distribusi Tekanan pada *Patch* Ketiga dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.20 Distribusi Tekanan pada *Patch* Keempat dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.21 Distribusi Tekanan pada *Patch* Kelima dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



4.2.2 Deformasi

Tabel 4.4 berikut menunjukkan nilai deformasi yang dihasilkan akibat pengaruh pembebanan tekanan yang diberikan sepanjang geometri *tubing* pada masing-masing sensitivitas *meshing* diukur berdasarkan *fixed support* pada ujung-ujung sambungan *tubing*.

Tabel 4.4 Deformasi pada *Flow Rate* 1050 bpd

Lokasi	<i>Meshing</i> Kasar (m)	<i>Meshing</i> Medium (m)	<i>Meshing</i> Halus (m)
0 inch	0	0	0
36 inch	1,7935e-008	4,5647e-009	8,9792e-009
72 inch	4,5035e-008	1,3396e-008	2,2806e-008
108 inch	5,3946e-008	2,0461e-008	2,9063e-008
144 inch	3,7761e-008	1,6311e-008	2,0618e-008
180 inch	1,3398e-008	6,1688e-009	7,2962e-009
216 inch	0	0	0

Berdasarkan pembebanan tekanan yang diberikan akibat pengaruh *flow rate* sepanjang geometri *tubing*, dapat diketahui bahwa deformasi paling besar terjadi pada jarak 108 inch dari dasar *tubing* pada geometri masing-masing variasi *meshing*. Nilai deformasi yang ditimbulkan yaitu sebesar 5,3946e-008 m untuk *meshing* kasar, 2,0461e-008 m untuk *meshing* medium, dan 2,9063e-008 m untuk *meshing* halus.

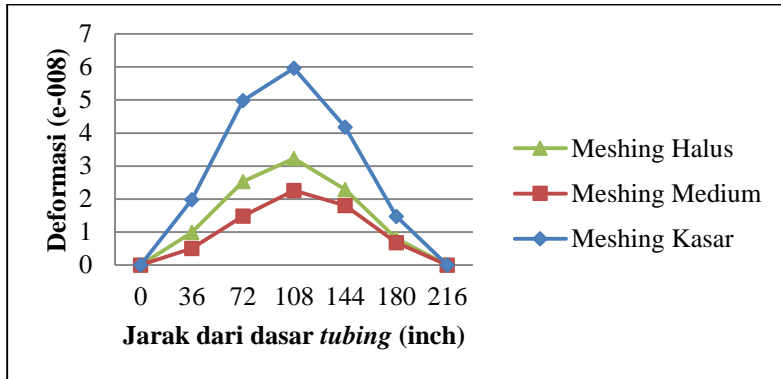
Hal tersebut diakibatkan karena *patch* yang terletak pada jarak 108 inch merupakan lokasi terjauh dari *fixed support* ujung sambungan atas maupun bawah. Meskipun tekanan yang terjadi pada daerah tersebut tidak sebesar tekanan pada dasar *tubing* yang merupakan lokasi awal terjadinya aliran fluida, tetapi kemampuan geometri dalam menahan pengaruh pembebanan yang diberikan tidak cukup kuat sehingga deformasi terjadi secara maksimum.

Pada ujung bawah sambungan *tubing* yang disebut sebagai lokasi 0 inch dan ujung atas sambungan *tubing* yang disebut sebagai lokasi 216 inch, deformasi yang terjadi yaitu sebesar 0 atau



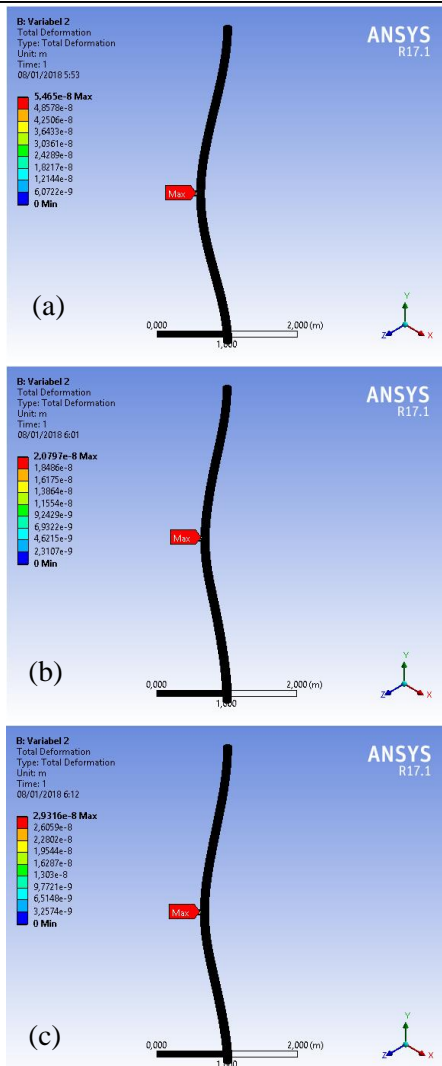
dapat dikatakan tidak terjadi deformasi. Hal tersebut karena ujung atas dan ujung bawah sambungan *tubing* merupakan lokasi di mana *fixed support* diterapkan.

Distribusi deformasi yang terjadi dapat dilihat pada grafik dalam Gambar 4.22 berikut.

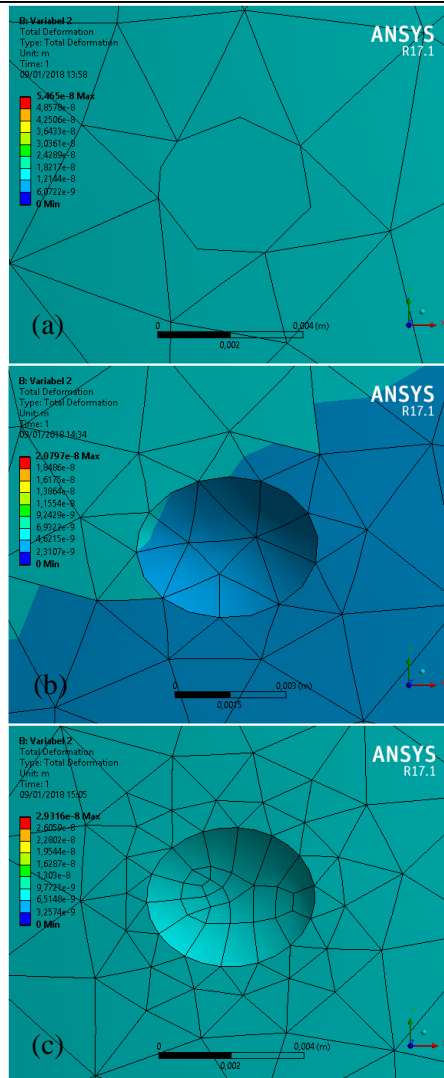


Gambar 4.22 Deformasi pada *Flow Rate* 1050 bpd

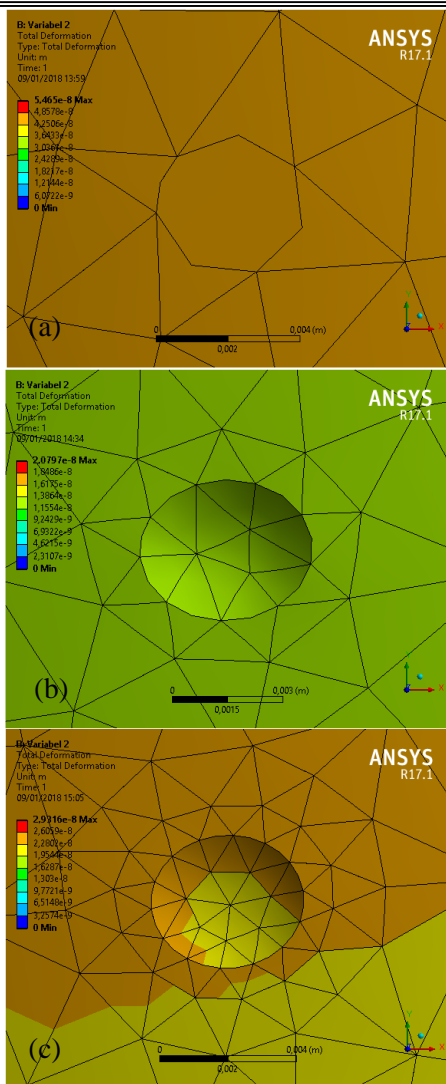
Berikut merupakan hasil deformasi di setiap lubang dengan lokasi dan jenis *meshing* yang berbeda pada *flow rate* 1050 bpd.



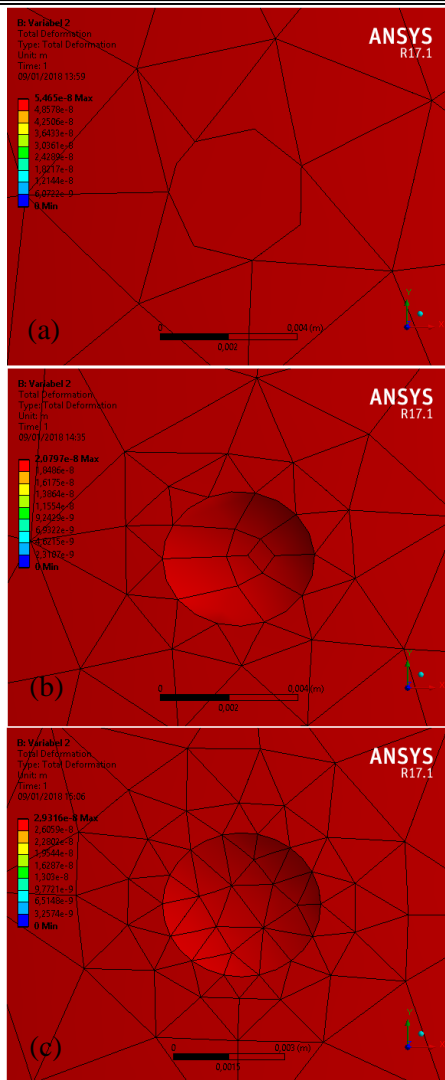
Gambar 4.23 Deformasi Sepanjang *Tubing* dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



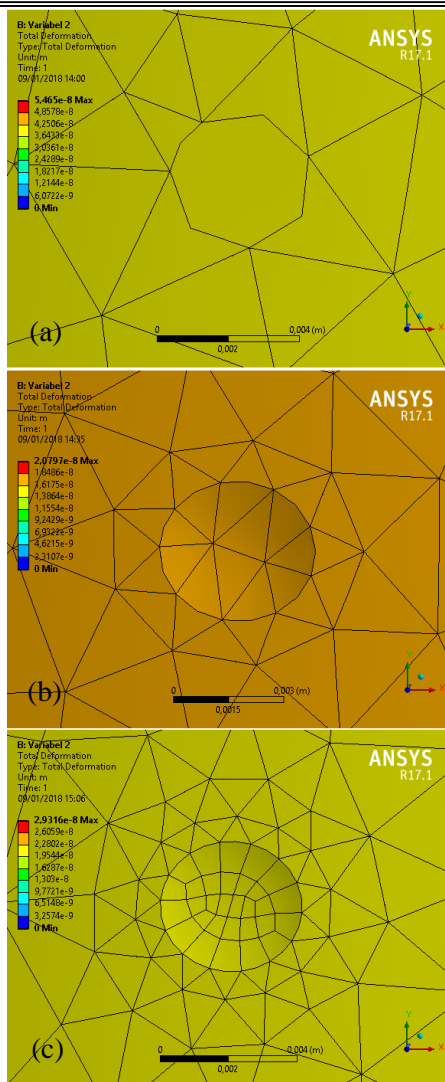
Gambar 4.24 Deformasi pada *Patch* Pertama dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



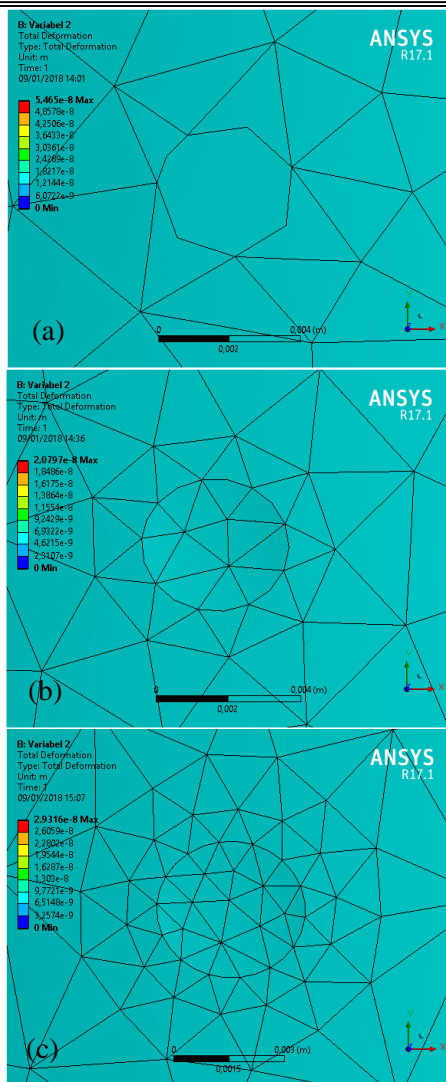
Gambar 4.25 Deformasi pada Patch Kedua dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.26 Deformasi pada Patch Ketiga dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.27 Deformasi pada *Patch* Keempat dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.28 Deformasi pada *Patch* Kelima dengan *Flow Rate* 1050 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



4.3 Analisis Pengaruh *Flow Rate* 1100 bpd

Pada variasi *flow rate* sebesar 1100 bpd akan dianalisis pengaruhnya terhadap *pressure drop* dan deformasi yang terjadi. Analisis tersebut dilakukan masing-masing pada hasil *meshing* kasar, medium, dan halus.

4.3.1 *Pressure Drop*

Tabel 4.5 berikut menunjukkan nilai tekanan akibat pengaruh *flow rate* sebesar 1100 bpd yang ditimbulkan pada masing-masing sensitivitas *meshing* diukur dari bagian dasar sambungan *tubing*.

Tabel 4.5 Nilai Tekanan pada *Flow Rate* 1100 bpd

Lokasi	<i>Meshing</i> Kasar	<i>Meshing</i> Medium	<i>Meshing</i> Halus
0 inch	281,1 Pa	280,0 Pa	283,0 Pa
36 inch	212,5 Pa	210,7 Pa	213,0 Pa
72 inch	168,8 Pa	167,8 Pa	169,4 Pa
108 inch	125,7 Pa	125,2 Pa	126,2 Pa
144 inch	83,57 Pa	82,09 Pa	83,42 Pa
180 inch	41,00 Pa	39,66 Pa	40,90 Pa
216 inch	-1,039 Pa	-1,290 Pa	-1,007 Pa

Berdasarkan Tabel 4.5 tersebut, dapat diketahui bahwa tekanan relatif pada sensitivitas *meshing* yang berbeda akan menghasilkan nilai yang berbeda pula. Tekanan awal akibat pengaruh *flow rate* sebesar 1100 bpd memiliki nilai yang hampir sama, yaitu sebesar 281,1 Pa; 280,0 Pa; dan 283,0 Pa untuk masing-masing *meshing* kasar, medium, dan halus. Nilai tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu signifikan karena hanya berselisih antara 1 sampai 3 Pa.

Pada ujung atas *tubing* dengan lokasi 216 inch, nilai tekanan yang negatif menunjukkan bahwa tekanan absolutnya adalah sebesar 1 atmosfer dikurangi nilai negatif dari tekanan relatif. Sehingga, tekanan ujung atas *tubing* pada *meshing* kasar yaitu

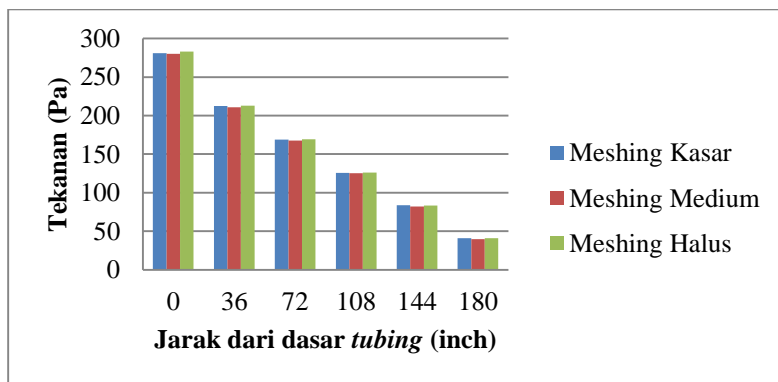


sebesar ($10^5 - 1,039$) Pa, pada *meshing* medium yaitu sebesar ($10^5 - 1,290$) Pa, dan pada *meshing* halus yaitu sebesar ($10^5 - 1,007$) Pa.

Dari data tersebut, pengaruh *flow rate* paling besar terjadi pada *meshing* halus, yaitu sebesar 283,0 Pa pada lokasi awal terjadinya aliran fluida. Selanjutnya terjadi *pressure drop* sepanjang geometri *tubing* yang hampir sama pada ketiga jenis sensitivitas *meshing*.

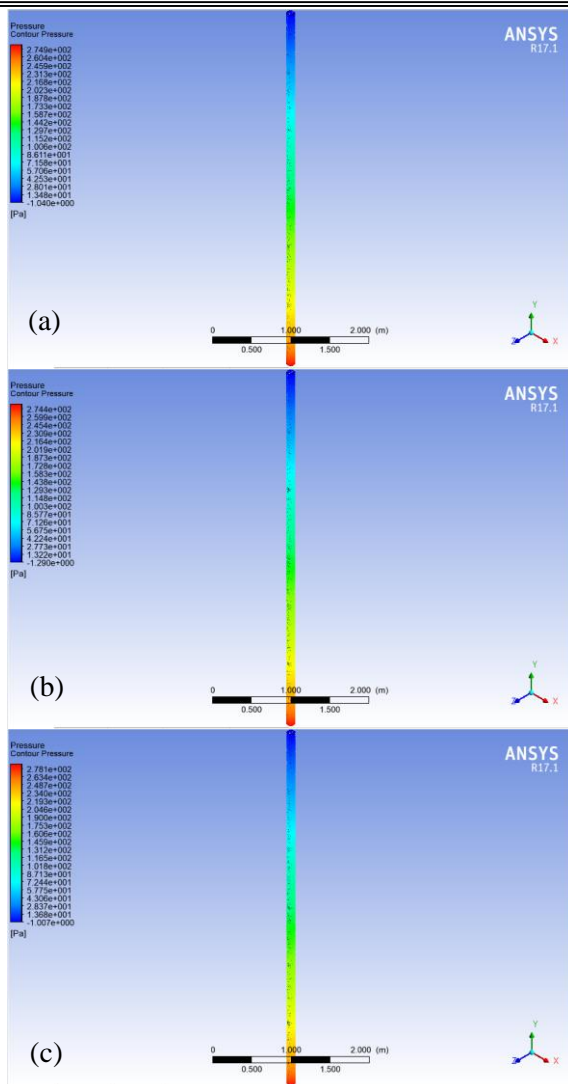
Meskipun demikian, nilai *pressure drop* paling besar akibat pengaruh *flow rate* 1100 bpd terjadi pada geometri dengan *meshing* halus. Hal tersebut menunjukkan bahwa *meshing* halus memiliki sensitivitas paling tinggi terhadap input *flow rate* yang diberikan. Sehingga akan mengakibatkan ketelitian yang tinggi pada nilai yang dihasilkan. Sesuai dengan pernyataan yang dikemukakan Bangun (2010), bahwa nilai kualitas kekasaran permukaan pada *meshing* menunjukkan ketelitian dan kepekaan geometri terhadap input yang diberikan.

Grafik *pressure drop* pada masing-masing sensitivitas *meshing* ditunjukkan pada grafik dalam Gambar 4.29 berikut.

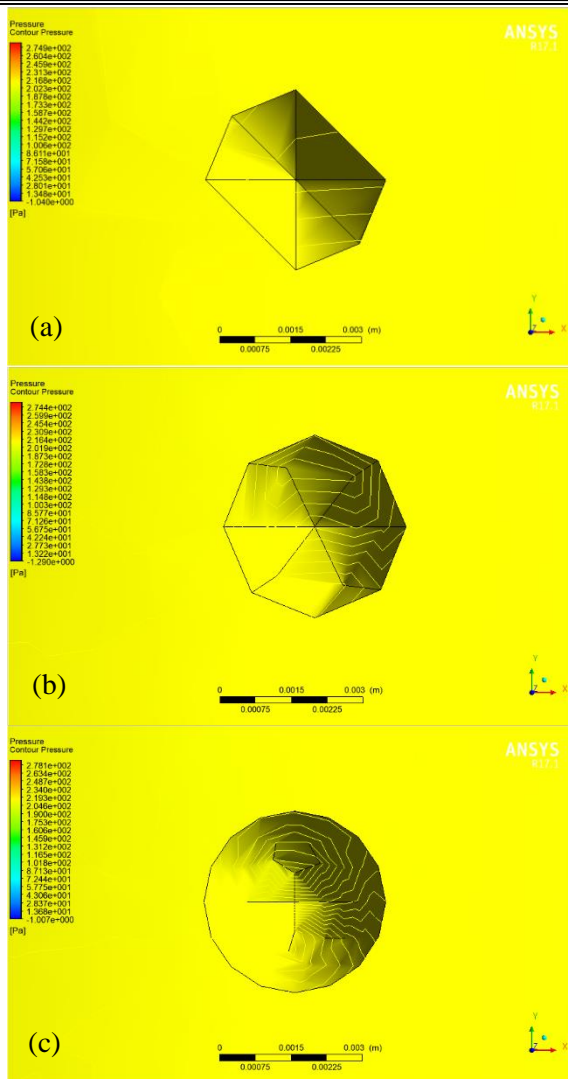


Gambar 4.29 *Pressure Drop* pada *Flow Rate* 1100 bpd

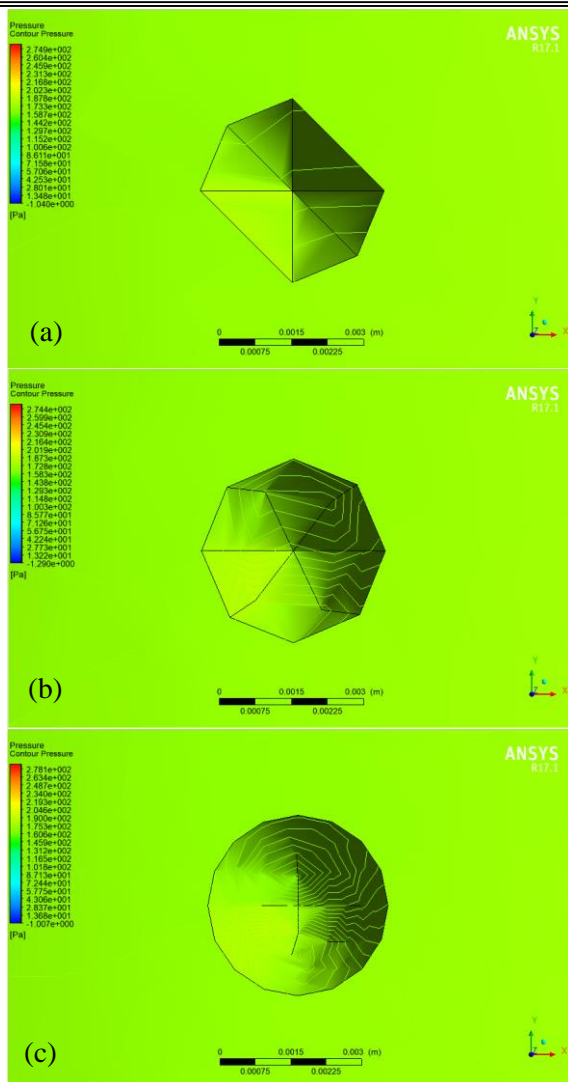
Berikut merupakan hasil distribusi tekanan di setiap lubang dengan lokasi dan jenis *meshing* yang berbeda pada *flow rate* 1100 bpd.



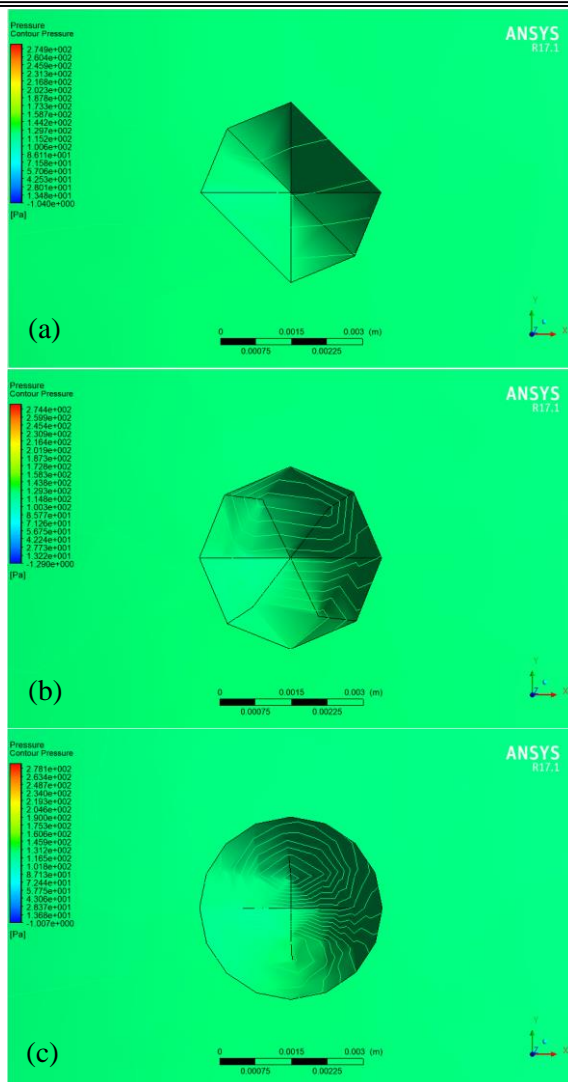
Gambar 4.30 Distribusi Tekanan Sepanjang *Tubing* dengan *Flow Rate* 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



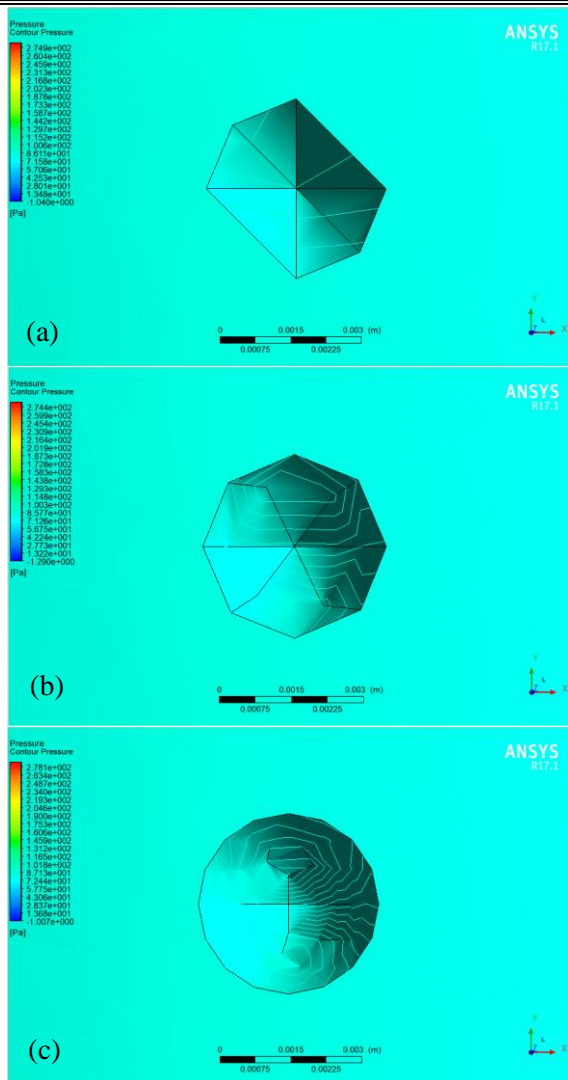
Gambar 4.31 Distribusi Tekanan pada *Patch* Pertama dengan *Flow Rate* 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



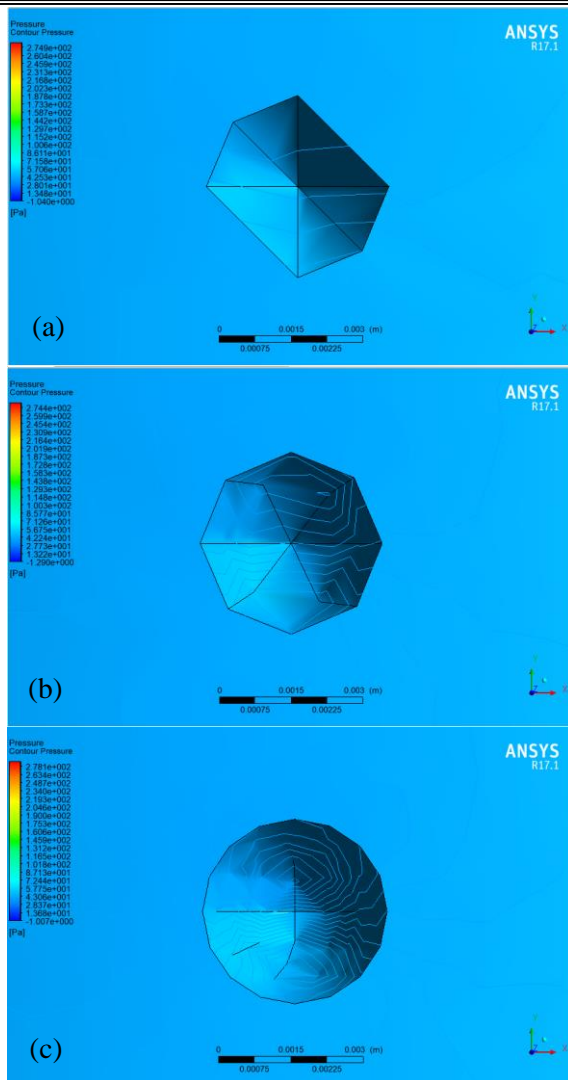
Gambar 4.32 Distribusi Tekanan pada *Patch* Kedua dengan *Flow Rate* 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.33 Distribusi Tekanan pada *Patch* Ketiga dengan *Flow Rate* 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.34 Distribusi Tekanan pada *Patch* Keempat dengan *Flow Rate* 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.35 Distribusi Tekanan pada *Patch* Kelima dengan *Flow Rate* 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



4.3.2 Deformasi

Tabel 4.6 berikut menunjukkan nilai deformasi yang dihasilkan akibat pengaruh pembebanan tekanan yang diberikan sepanjang geometri *tubing* pada masing-masing sensitivitas *meshing* diukur berdasarkan *fixed support* pada ujung-ujung sambungan *tubing*.

Tabel 4.6 Deformasi pada *Flow Rate* 1100 bpd

Lokasi	<i>Meshing</i> Kasar (m)	<i>Meshing</i> Medium (m)	<i>Meshing</i> Halus (m)
0 inch	0	0	0
36 inch	1,8899e-008	4,8270e-009	9,4763e-009
72 inch	4,7427e-008	1,4176e-008	2,4069e-008
108 inch	5,6815e-008	2,1643e-008	3,0675e-008
144 inch	3,9766e-008	1,7244e-008	2,1756e-008
180 inch	1,4093e-008	6,5170e-009	7,6936e-009
216 inch	0	0	0

Berdasarkan pembebanan tekanan yang diberikan akibat pengaruh *flow rate* sepanjang geometri *tubing*, dapat diketahui bahwa deformasi paling besar terjadi pada jarak 108 inch dari dasar *tubing* pada geometri masing-masing variasi *meshing*. Nilai deformasi yang ditimbulkan yaitu sebesar 5,6815e-008 m untuk *meshing* kasar, 2,1643e-008 m untuk *meshing* medium, dan 3,0675e-008 m untuk *meshing* halus.

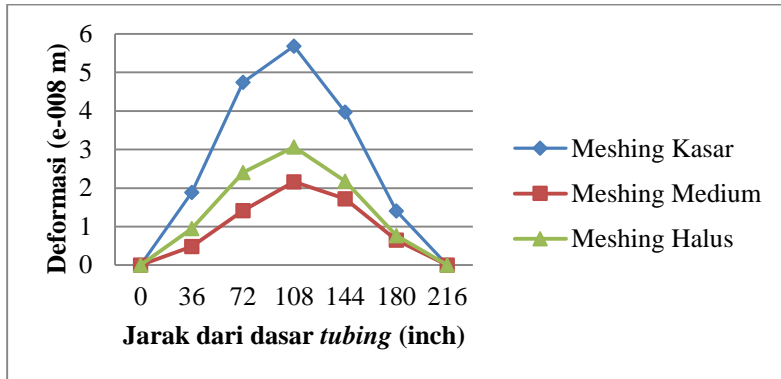
Hal tersebut diakibatkan karena *patch* yang terletak pada jarak 108 inch merupakan lokasi terjauh dari *fixed support* ujung sambungan atas maupun bawah. Meskipun tekanan yang terjadi pada daerah tersebut tidak sebesar tekanan pada dasar *tubing* yang merupakan lokasi awal terjadinya aliran fluida, tetapi kemampuan geometri dalam menahan pengaruh pembebanan yang diberikan tidak cukup kuat sehingga deformasi terjadi secara maksimum.

Pada ujung bawah sambungan *tubing* yang disebut sebagai lokasi 0 inch dan ujung atas sambungan *tubing* yang disebut sebagai lokasi 216 inch, deformasi yang terjadi yaitu sebesar 0 atau



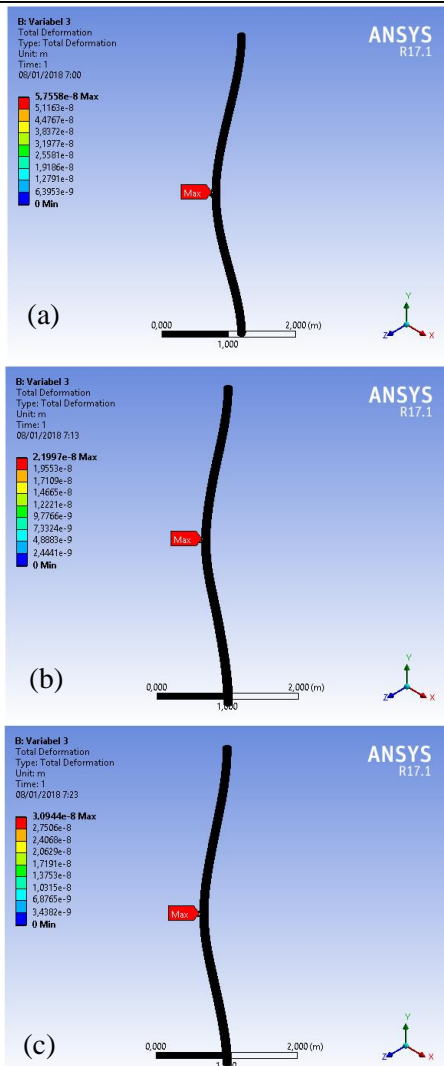
dapat dikatakan tidak terjadi deformasi. Hal tersebut karena ujung atas dan ujung bawah sambungan *tubing* merupakan lokasi di mana *fixed support* diterapkan.

Distribusi deformasi yang terjadi dapat dilihat pada grafik dalam Gambar 4.36 berikut.

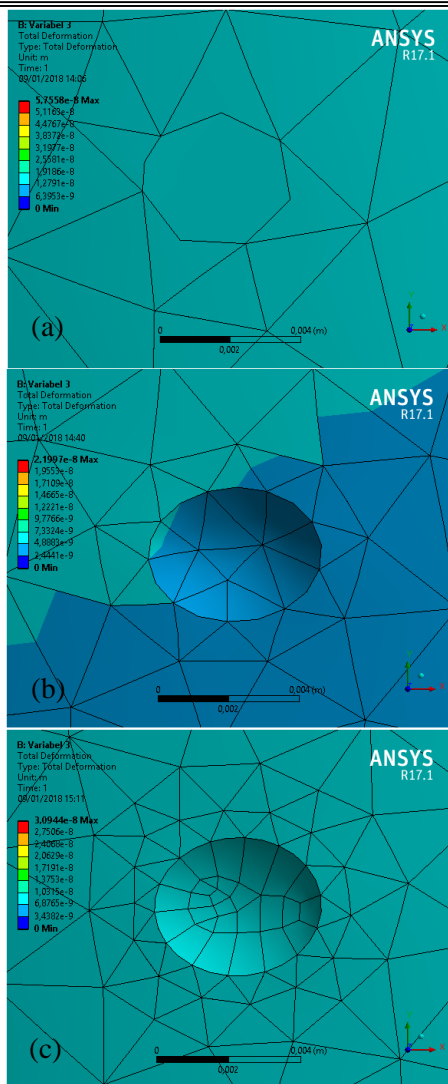


Gambar 4.36 Deformasi pada *Flow Rate* 1100 bpd

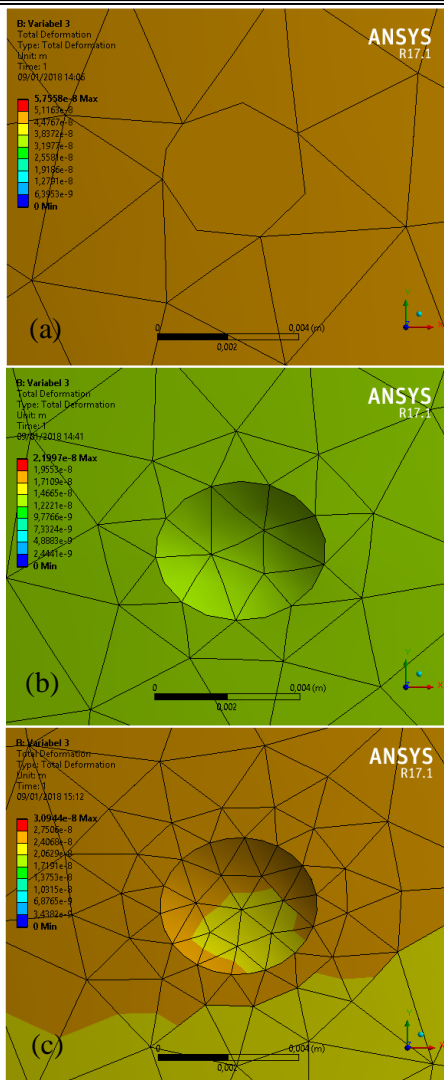
Berikut merupakan hasil deformasi di setiap lubang dengan lokasi dan jenis *meshing* yang berbeda pada *flow rate* 1100 bpd.



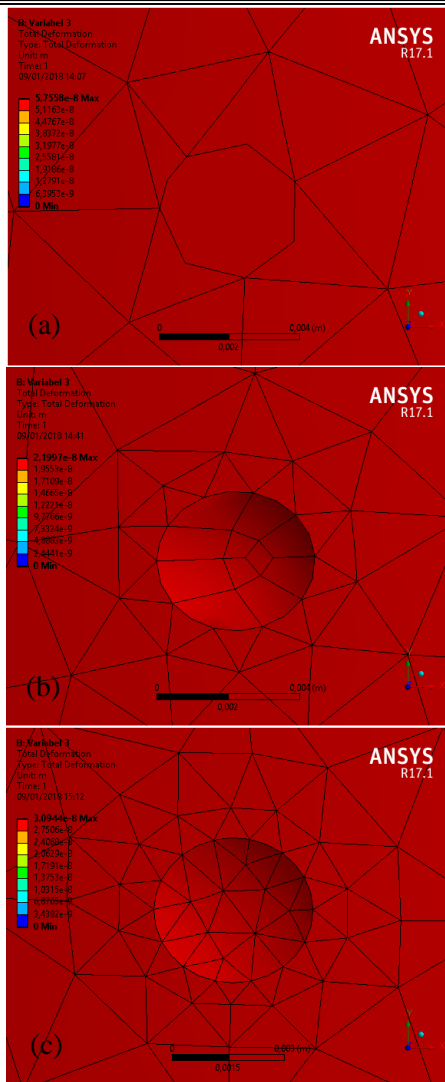
Gambar 4.37 Deformasi Sepanjang Tubing dengan Flow Rate 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



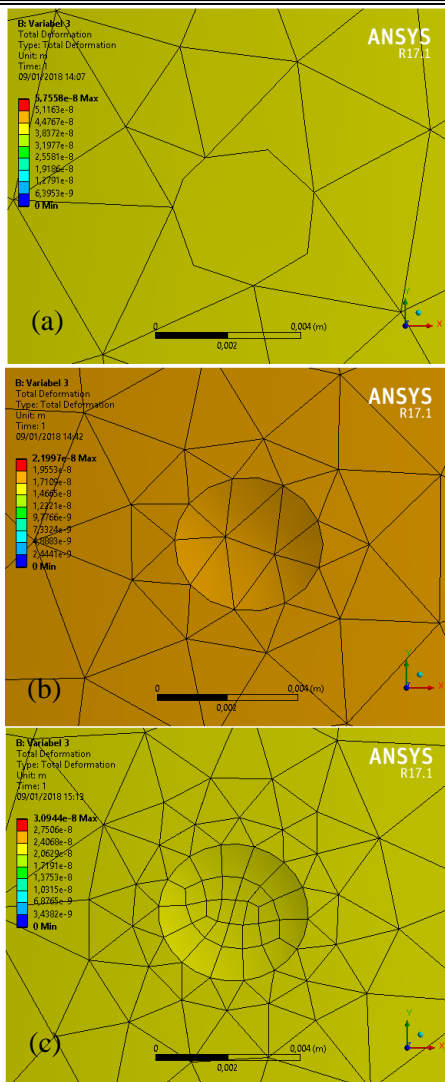
Gambar 4.38 Deformasi pada *Patch* Pertama dengan *Flow Rate* 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



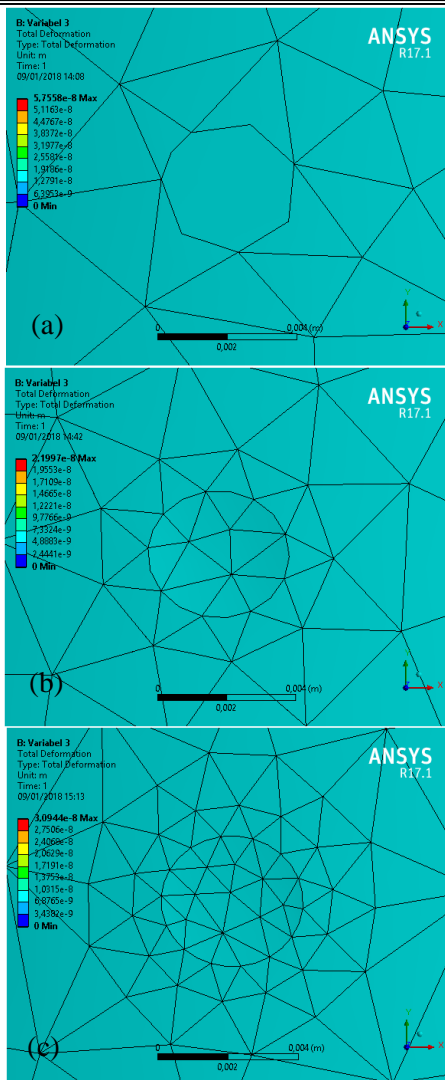
Gambar 4.39 Deformasi pada Patch Kedua dengan *Flow Rate* 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.40 Deformasi pada Patch Ketiga dengan Flow Rate 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.41 Deformasi pada *Patch* Keempat dengan *Flow Rate* 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.42 Deformasi pada *Patch* Kelima dengan *Flow Rate* 1100 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



4.4 Analisis Pengaruh *Flow Rate* 1150 bpd

Pada variasi *flow rate* sebesar 1150 bpd akan dianalisis pengaruhnya terhadap *pressure drop* dan deformasi yang terjadi. Analisis tersebut dilakukan masing-masing pada hasil *meshing* kasar, medium, dan halus.

4.4.1 *Pressure Drop*

Tabel 4.7 berikut menunjukkan nilai tekanan akibat pengaruh *flow rate* sebesar 1150 bpd yang ditimbulkan pada masing-masing sensitivitas *meshing* diukur dari bagian dasar sambungan *tubing*.

Tabel 4.7 Nilai Tekanan pada *Flow Rate* 1150 bpd

Lokasi	<i>Meshing</i> Kasar	<i>Meshing</i> Medium	<i>Meshing</i> Halus
0 inch	296,4 Pa	295,1 Pa	298,3 Pa
36 inch	223,4 Pa	221,5 Pa	224,0 Pa
72 inch	177,4 Pa	176,4 Pa	178,1 Pa
108 inch	132,0 Pa	131,6 Pa	132,5 Pa
144 inch	87,82 Pa	86,20 Pa	87,65 Pa
180 inch	43,05 Pa	41,55 Pa	42,88 Pa
216 inch	-1,151 Pa	-1,387 Pa	-1,098 Pa

Berdasarkan Tabel 4.7 tersebut, dapat diketahui bahwa tekanan pada sensitivitas *meshing* yang berbeda akan menghasilkan nilai yang berbeda pula. Tekanan awal akibat pengaruh *flow rate* sebesar 1150 bpd memiliki nilai yang hampir sama, yaitu sebesar 296,4 Pa; 295,1 Pa; dan 298,3 Pa untuk masing-masing *meshing* kasar, medium, dan halus. Nilai tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu signifikan karena hanya berselisih antara 1 sampai 3 Pa.

Pada ujung atas *tubing* dengan lokasi 216 inch, nilai tekanan yang negatif menunjukkan bahwa tekanan absolutnya adalah sebesar 1 atmosfer dikurangi nilai negatif dari tekanan relatif. Sehingga, tekanan ujung atas *tubing* pada *meshing* kasar yaitu

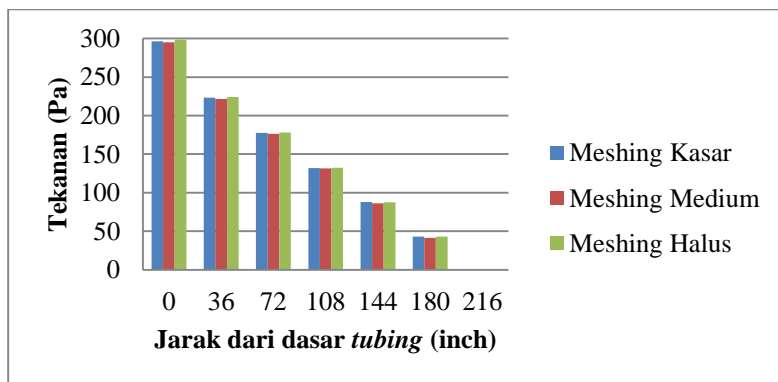


sebesar ($10^5 - 1,151$) Pa, pada *meshing* medium yaitu sebesar ($10^5 - 1,387$) Pa, dan pada *meshing* halus yaitu sebesar ($10^5 - 1,098$) Pa.

Dari data tersebut, pengaruh *flow rate* paling besar terjadi pada *meshing* halus, yaitu sebesar 298,3 Pa pada lokasi awal terjadinya aliran fluida. Selanjutnya terjadi *pressure drop* sepanjang geometri *tubing* yang hampir sama pada ketiga jenis sensitivitas *meshing*.

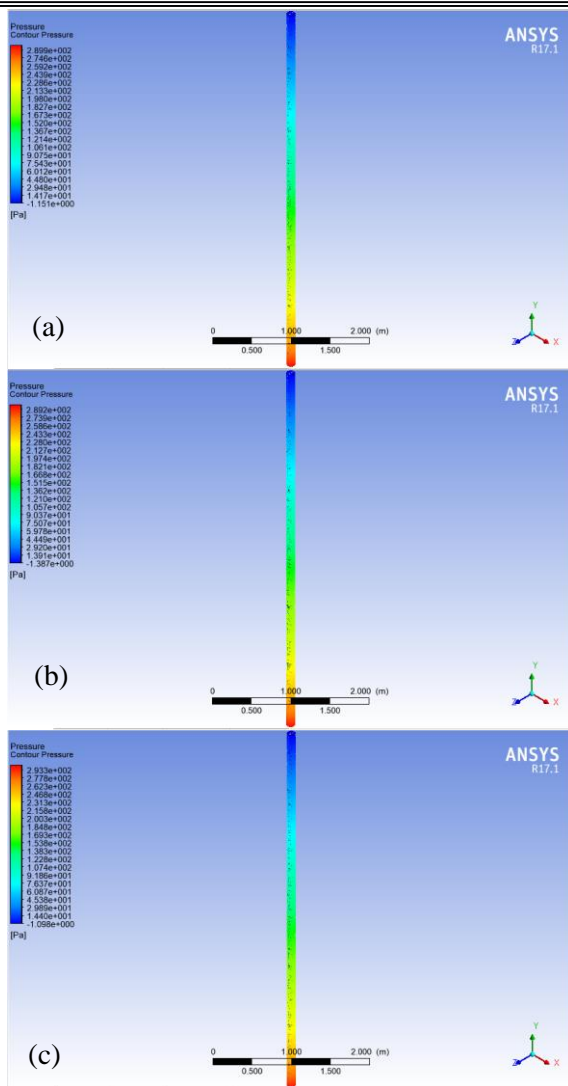
Meskipun demikian, nilai *pressure drop* paling besar akibat pengaruh *flow rate* 1150 bpd terjadi pada geometri dengan *meshing* halus. Hal tersebut menunjukkan bahwa *meshing* halus memiliki sensitivitas paling tinggi terhadap input *flow rate* yang diberikan. Sehingga akan mengakibatkan ketelitian yang tinggi pada nilai yang dihasilkan. Sesuai dengan pernyataan yang dikemukakan Bangun (2010), bahwa nilai kualitas kekasaran permukaan pada *meshing* menunjukkan ketelitian dan kepekaan geometri terhadap input yang diberikan.

Grafik *pressure drop* pada masing-masing sensitivitas *meshing* ditunjukkan pada grafik dalam Gambar 4.43 berikut.

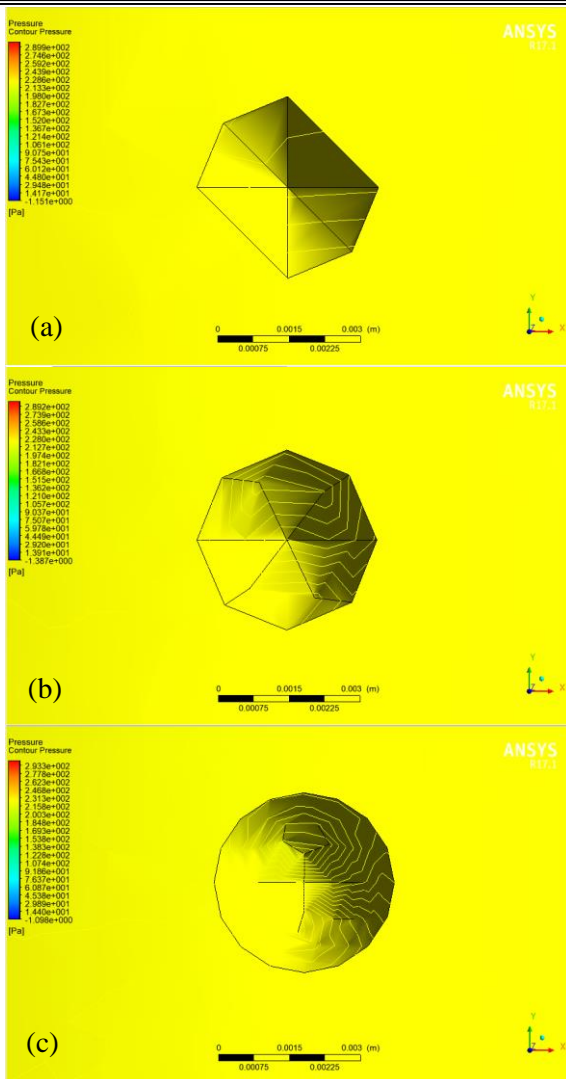


Gambar 4.43 *Pressure Drop* pada *Flow Rate* 1150 bpd

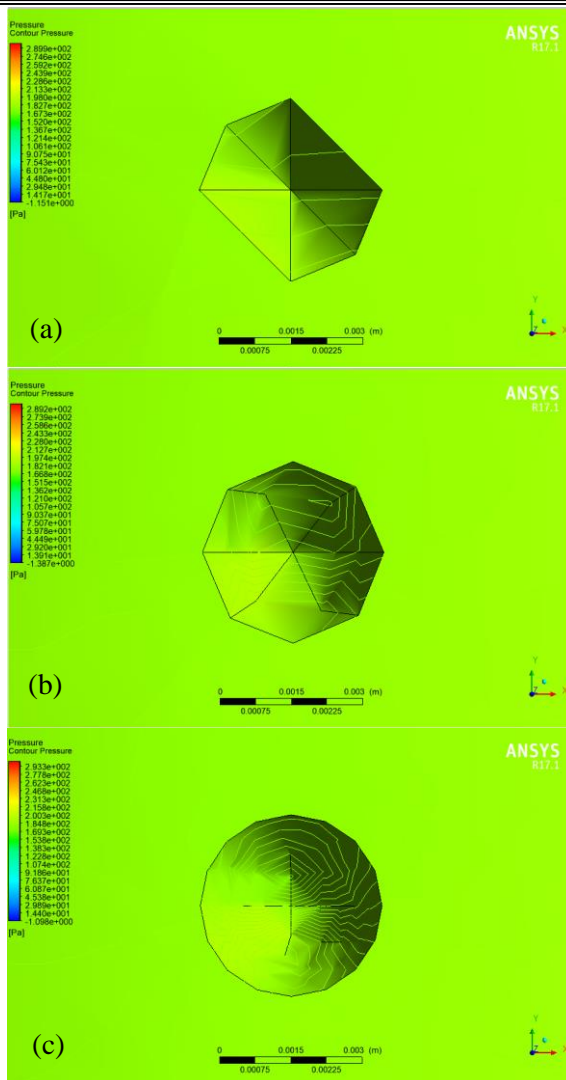
Berikut merupakan hasil distribusi tekanan di setiap lubang dengan lokasi dan jenis *meshing* yang berbeda pada *flow rate* 1150 bpd.



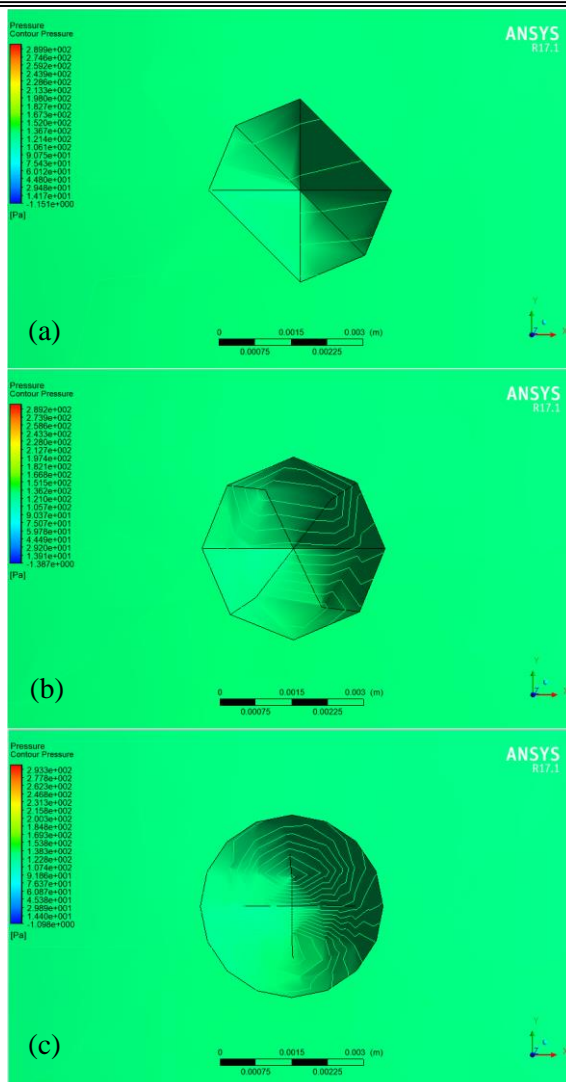
Gambar 4.44 Distribusi Tekanan Sepanjang *Tubing* dengan *Flow Rate* 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



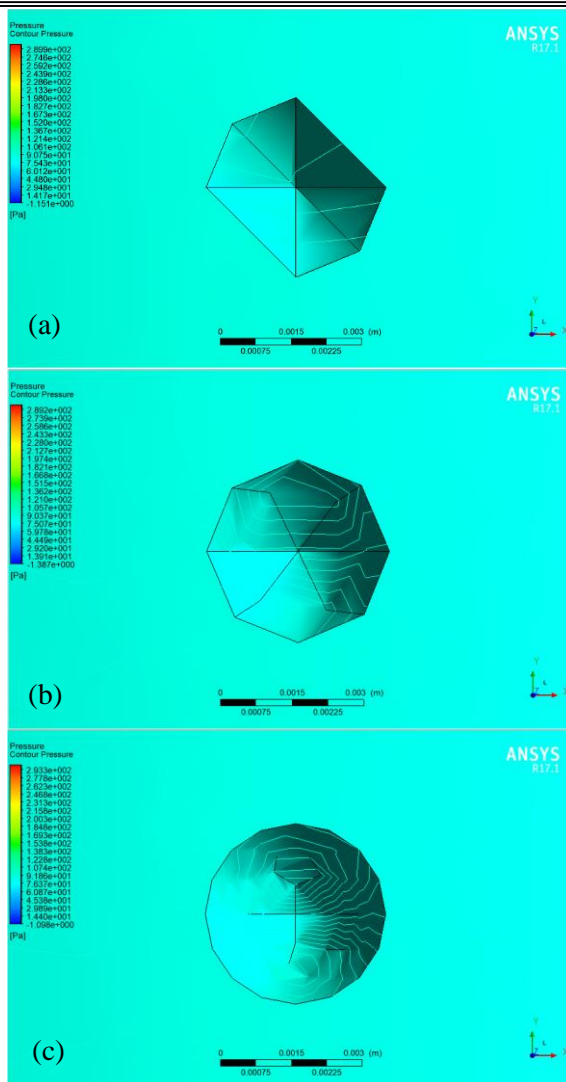
Gambar 4.45 Distribusi Tekanan pada *Patch* Pertama dengan *Flow Rate* 1150 bpd, pada (a) *meshing kasar*, (b) *meshing medium*, dan (c) *meshing halus*



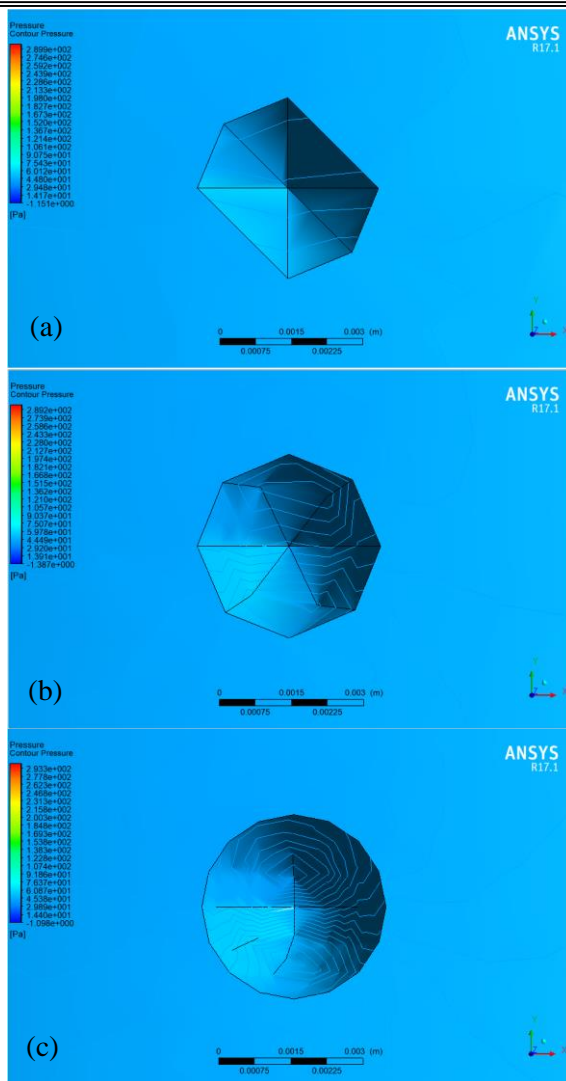
Gambar 4.46 Distribusi Tekanan pada *Patch* Kedua dengan *Flow Rate* 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.47 Distribusi Tekanan pada *Patch* Ketiga dengan *Flow Rate* 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.48 Distribusi Tekanan pada *Patch Keempat* dengan *Flow Rate* 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.49 Distribusi Tekanan pada *Patch* Kelima dengan Flow Rate 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



4.4.2 Deformasi

Tabel 4.8 berikut menunjukkan nilai deformasi yang dihasilkan akibat pengaruh pembebanan tekanan yang diberikan sepanjang geometri *tubing* pada masing-masing sensitivitas *meshing* diukur berdasarkan *fixed support* pada ujung-ujung sambungan *tubing*.

Tabel 4.8 Deformasi pada *Flow Rate* 1150 bpd

Lokasi	<i>Meshing</i> Kasar (m)	<i>Meshing</i> Medium (m)	<i>Meshing</i> Halus (m)
0 inch	0	0	0
36 inch	1,9842e-008	5,0516e-009	9,9623e-009
72 inch	4,9795e-008	1,4817e-008	2,5312e-008
108 inch	5,9667e-008	2,2635e-008	3,2277e-008
144 inch	4,1757e-008	1,8019e-008	2,2899e-008
180 inch	1,4802e-008	6,8024e-009	8,0899e-009
216 inch	0	0	0

Berdasarkan pembebanan tekanan yang diberikan akibat pengaruh *flow rate* sepanjang geometri *tubing*, dapat diketahui bahwa deformasi paling besar terjadi pada jarak 108 inch dari dasar *tubing* pada geometri masing-masing variasi *meshing*. Nilai deformasi yang ditimbulkan yaitu sebesar 5,9667e-008 m untuk *meshing* kasar, 2,2635e-008 m untuk *meshing* medium, dan 3,2277e-008 m untuk *meshing* halus.

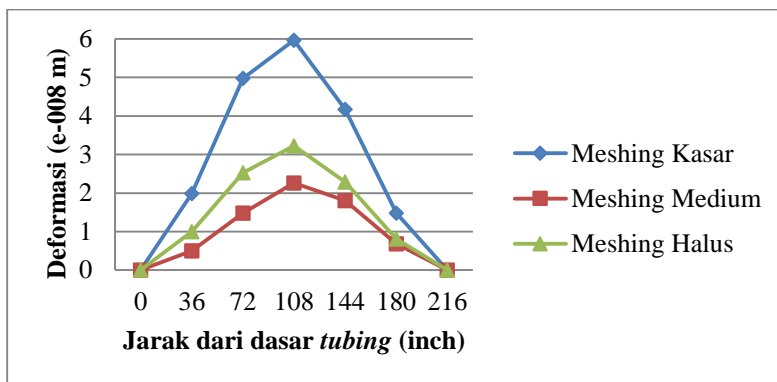
Hal tersebut diakibatkan karena *patch* yang terletak pada jarak 108 inch merupakan lokasi terjauh dari *fixed support* ujung sambungan atas maupun bawah. Meskipun tekanan yang terjadi pada daerah tersebut tidak sebesar tekanan pada dasar *tubing* yang merupakan lokasi awal terjadinya aliran fluida, tetapi kemampuan geometri dalam menahan pengaruh pembebanan yang diberikan tidak cukup kuat sehingga deformasi terjadi secara maksimum.

Pada ujung bawah sambungan *tubing* yang disebut sebagai lokasi 0 inch dan ujung atas sambungan *tubing* yang disebut sebagai lokasi 216 inch, deformasi yang terjadi yaitu sebesar 0 atau



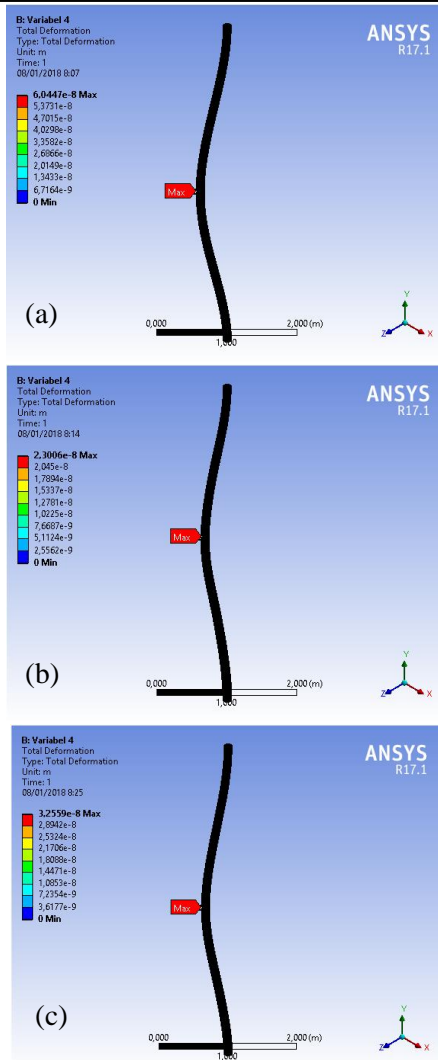
dapat dikatakan tidak terjadi deformasi. Hal tersebut karena ujung atas dan ujung bawah sambungan *tubing* merupakan lokasi di mana *fixed support* diterapkan.

Distribusi deformasi yang terjadi dapat dilihat pada grafik dalam Gambar 4.50 berikut.

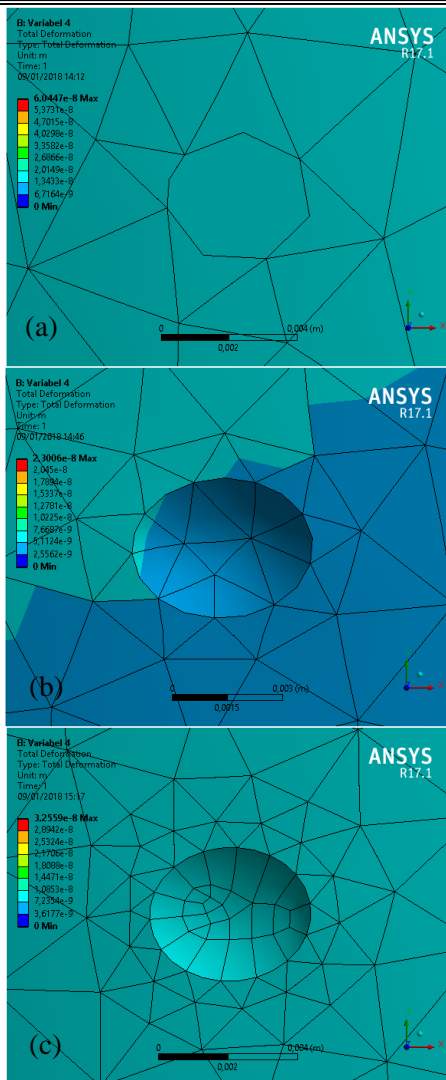


Gambar 4.50 Deformasi pada *Flow Rate* 1150 bpd

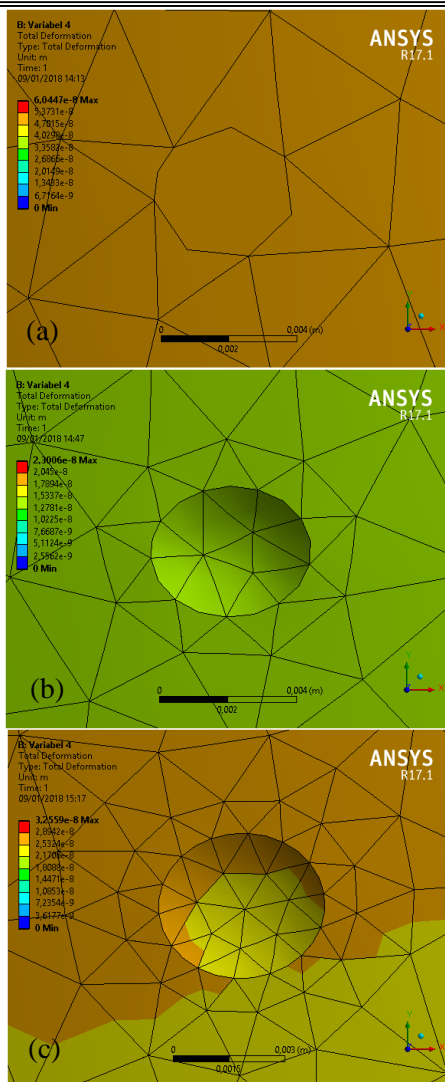
Berikut merupakan hasil deformasi di setiap lubang dengan lokasi dan jenis *meshing* yang berbeda pada *flow rate* 1150 bpd.



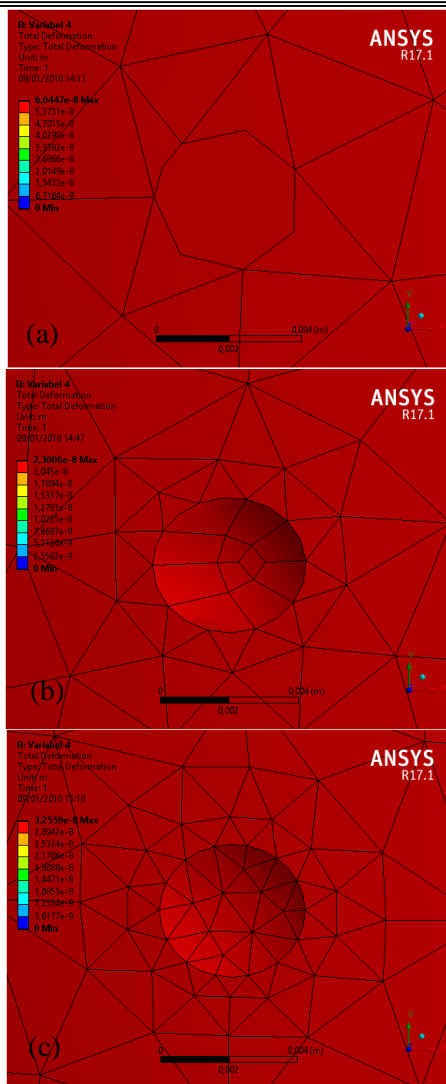
Gambar 4.51 Deformasi Sepanjang Tubing dengan Flow Rate 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



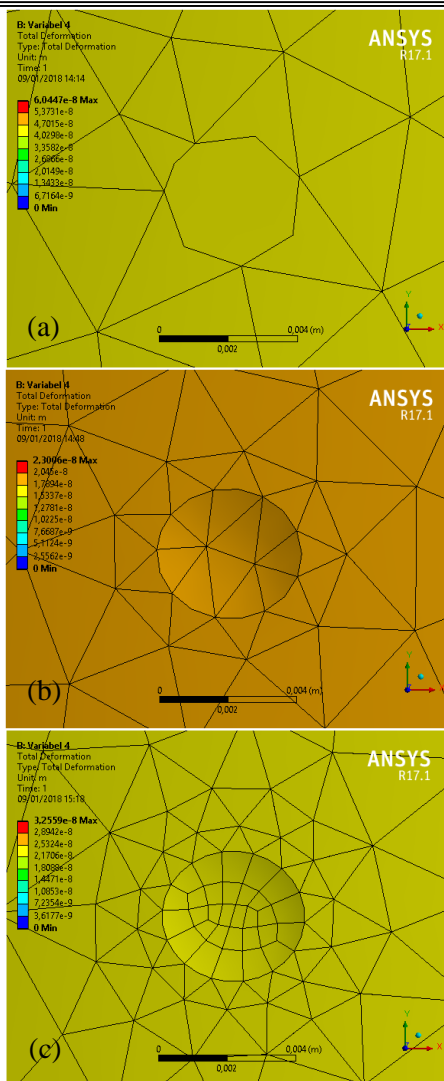
Gambar 4.52 Deformasi pada *Patch* Pertama dengan *Flow Rate* 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



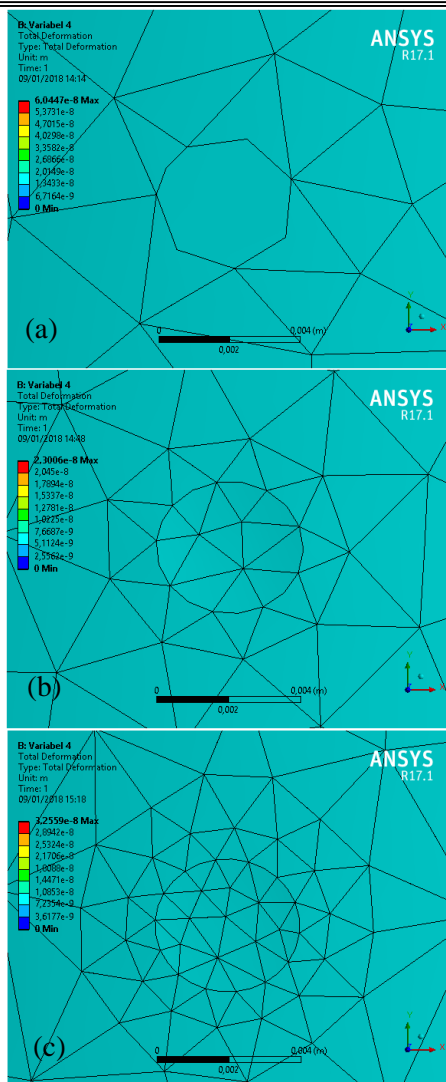
Gambar 4.53 Deformasi pada Patch Kedua dengan *Flow Rate* 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.54 Deformasi pada Patch Ketiga dengan *Flow Rate* 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.55 Deformasi pada *Patch* Keempat dengan *Flow Rate* 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.56 Deformasi pada *Patch* Kelima dengan *Flow Rate* 1150 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



4.5 Analisis Pengaruh *Flow Rate* 1200 bpd

Pada variasi *flow rate* sebesar 1200 bpd akan dianalisis pengaruhnya terhadap *pressure drop* dan deformasi yang terjadi. Analisis tersebut dilakukan masing-masing pada hasil *meshing* kasar, medium, dan halus.

4.5.1 *Pressure Drop*

Tabel 4.9 berikut menunjukkan nilai tekanan akibat pengaruh *flow rate* sebesar 1200 bpd yang ditimbulkan pada masing-masing sensitivitas *meshing* diukur dari bagian dasar sambungan *tubing*.

Tabel 4.9 Nilai Tekanan pada *Flow Rate* 1200 bpd

Lokasi	<i>Meshing</i> Kasar	<i>Meshing</i> Medium	<i>Meshing</i> Halus
0 inch	311,7 Pa	310,3 Pa	313,8 Pa
36 inch	234,5 Pa	232,3 Pa	235,2 Pa
72 inch	186,1 Pa	184,9 Pa	186,8 Pa
108 inch	138,4 Pa	137,8 Pa	139,0 Pa
144 inch	92,06 Pa	90,26 Pa	91,94 Pa
180 inch	45,05 Pa	43,45 Pa	44,93 Pa
216 inch	-1,266 Pa	-1,530 Pa	-1,185 Pa

Berdasarkan Tabel 4.9 tersebut, dapat diketahui bahwa tekanan pada sensitivitas *meshing* yang berbeda akan menghasilkan nilai yang berbeda pula. Tekanan awal akibat pengaruh *flow rate* sebesar 1200 bpd memiliki nilai yang hampir sama, yaitu sebesar 311,7 Pa; 310,3 Pa; dan 313,8 Pa untuk masing-masing *meshing* kasar, medium, dan halus. Nilai tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu signifikan karena hanya berselisih antara 1 sampai 3 Pa.

Pada ujung atas *tubing* dengan lokasi 216 inch, nilai tekanan yang negatif menunjukkan bahwa tekanan absolutnya adalah sebesar 1 atmosfer dikurangi nilai negatif dari tekanan relatif. Sehingga, tekanan ujung atas *tubing* pada *meshing* kasar yaitu

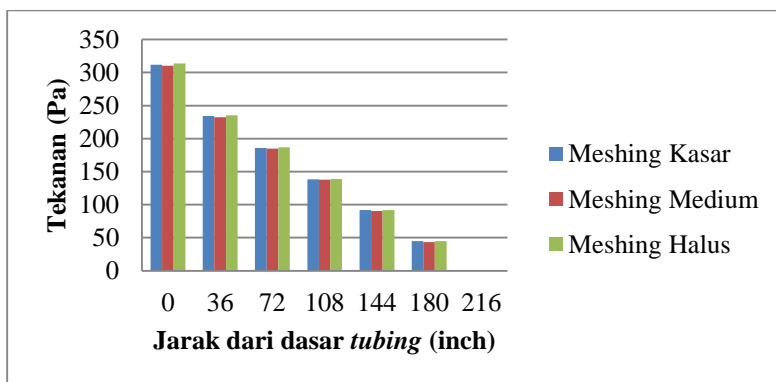


sebesar ($10^5 - 1,266$) Pa, pada *meshing* medium yaitu sebesar ($10^5 - 1,530$) Pa, dan pada *meshing* halus yaitu sebesar ($10^5 - 1,185$) Pa.

Dari data tersebut, pengaruh *flow rate* paling besar terjadi pada *meshing* halus, yaitu sebesar 313,8 Pa pada lokasi awal terjadinya aliran fluida. Selanjutnya terjadi *pressure drop* sepanjang geometri *tubing* yang hampir sama pada ketiga jenis sensitivitas *meshing*.

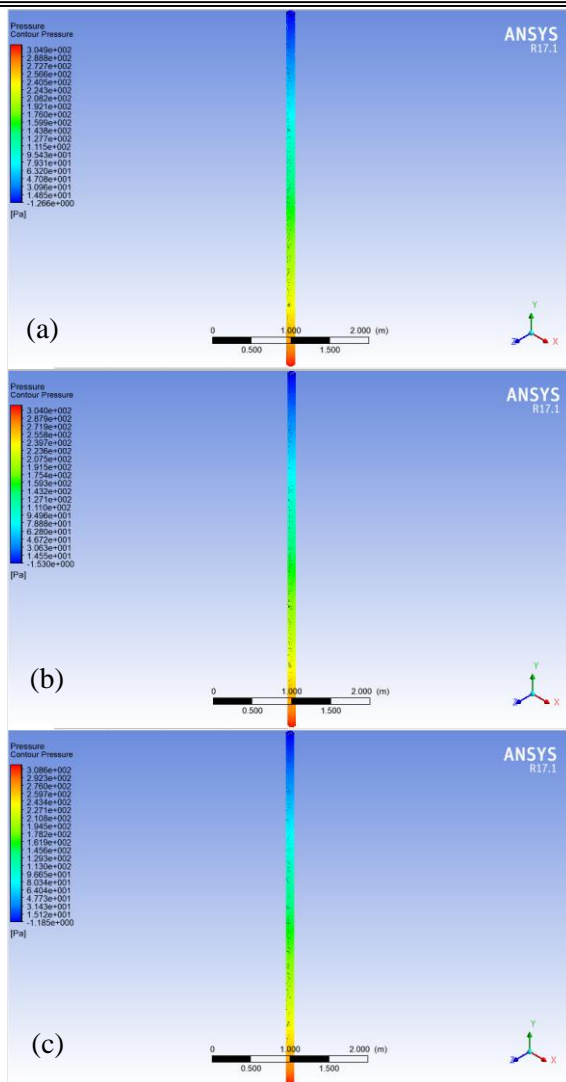
Meskipun demikian, nilai *pressure drop* paling besar akibat pengaruh *flow rate* 1200 bpd terjadi pada geometri dengan *meshing* halus. Hal tersebut menunjukkan bahwa *meshing* halus memiliki sensitivitas paling tinggi terhadap input *flow rate* yang diberikan. Sehingga akan mengakibatkan ketelitian yang tinggi pada nilai yang dihasilkan. Sesuai dengan pernyataan yang dikemukakan Bangun (2010), bahwa nilai kualitas kekasaran permukaan pada *meshing* menunjukkan ketelitian dan kepekaan geometri terhadap input yang diberikan.

Grafik *pressure drop* pada masing-masing sensitivitas *meshing* ditunjukkan pada grafik dalam Gambar 4.57 berikut.

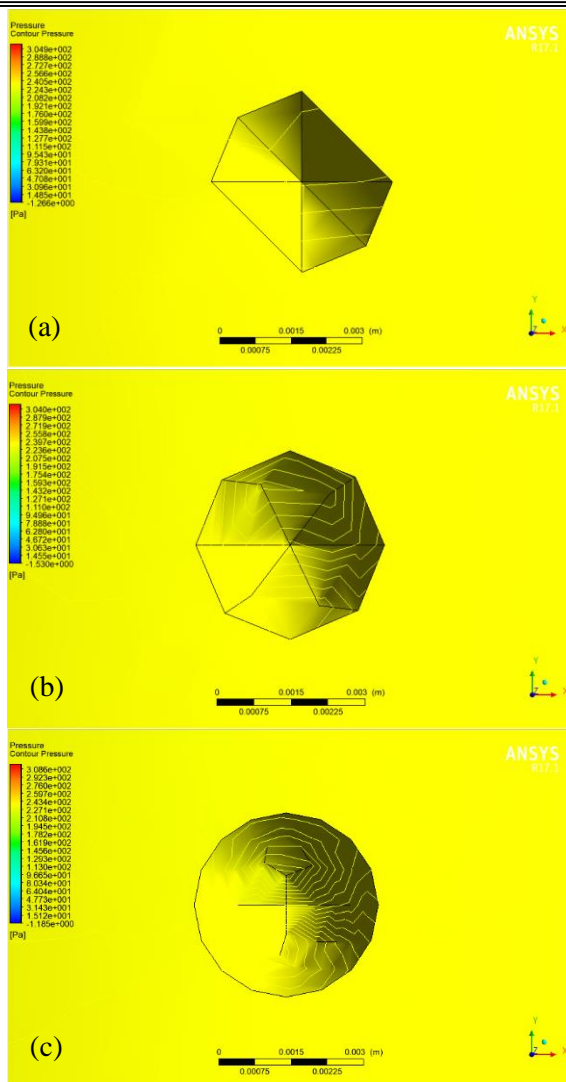


Gambar 4.57 *Pressure Drop* pada *Flow Rate* 1200 bpd

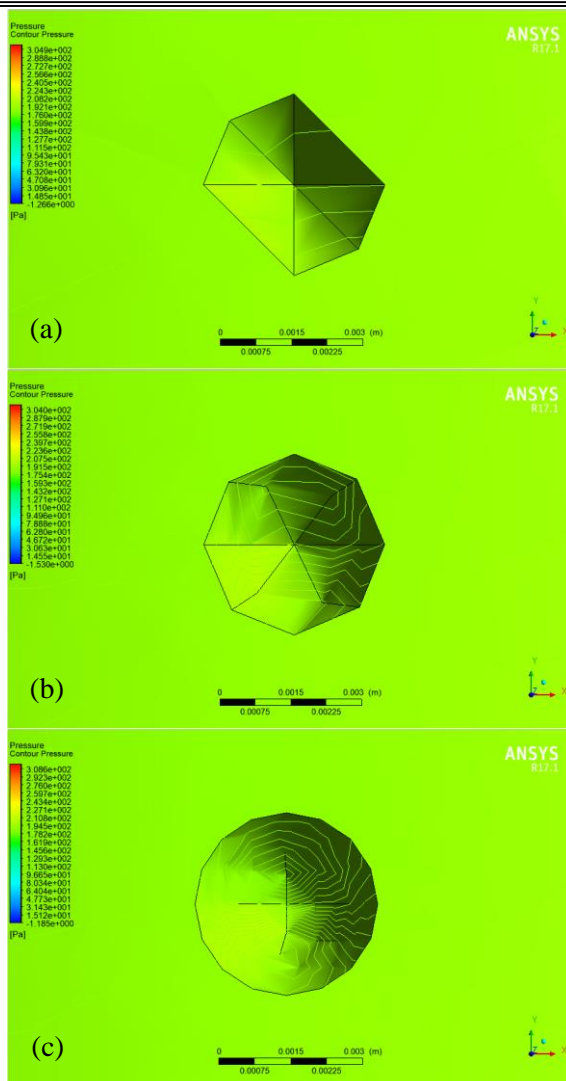
Berikut merupakan hasil distribusi tekanan di setiap lubang dengan lokasi dan jenis *meshing* yang berbeda pada *flow rate* 1000 bpd.



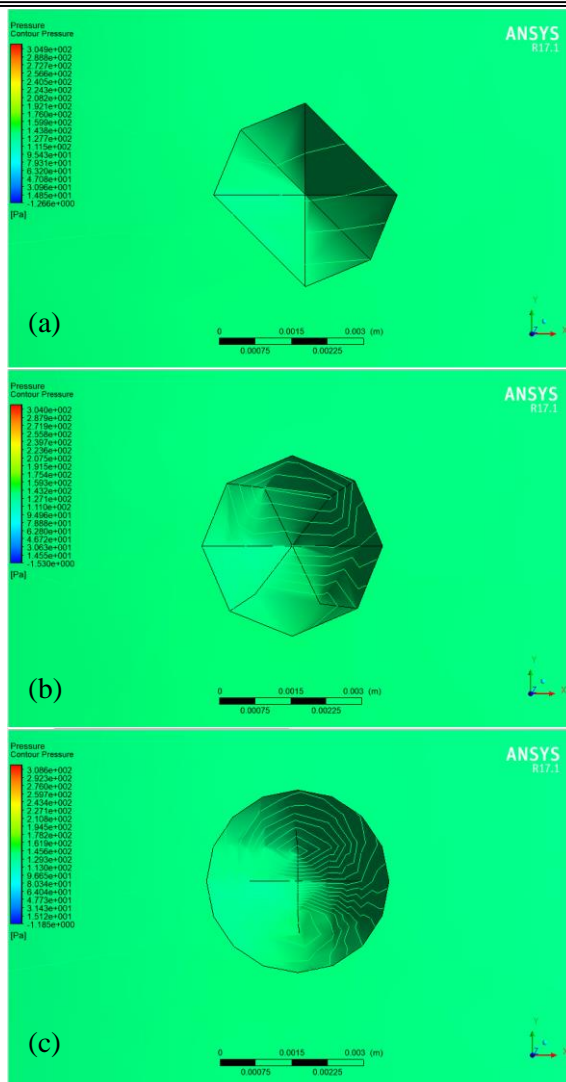
Gambar 4.58 Distribusi Tekanan Sepanjang *Tubing* dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



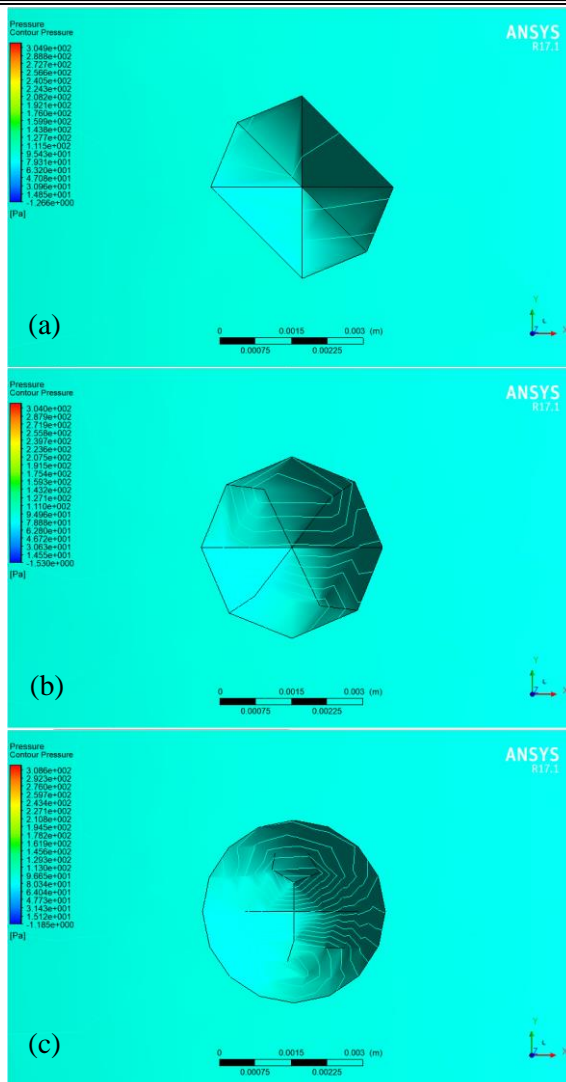
Gambar 4.59 Distribusi Tekanan pada *Patch* Pertama dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



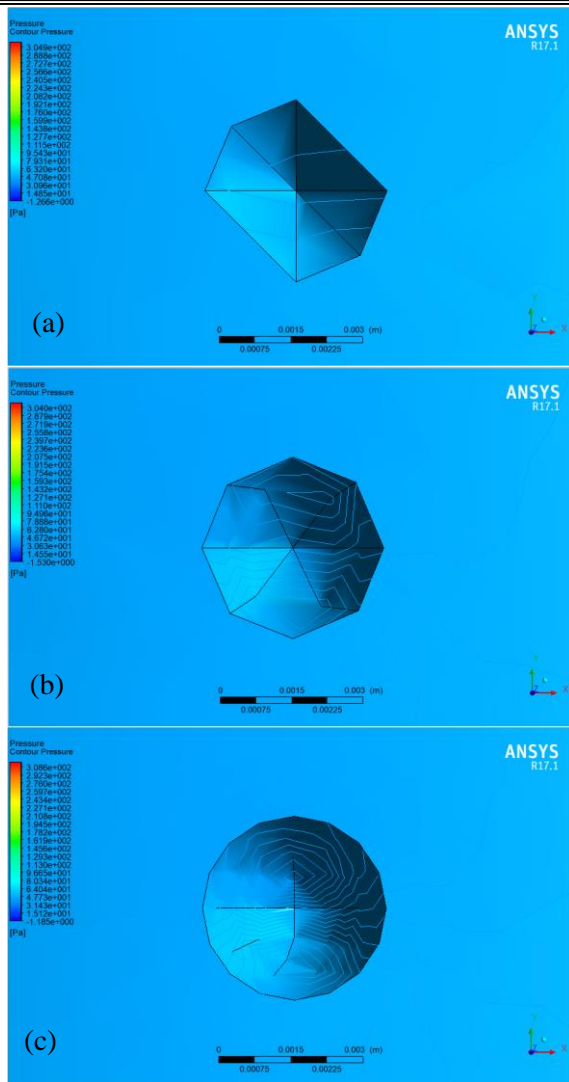
Gambar 4.60 Distribusi Tekanan pada *Patch* Kedua dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.61 Distribusi Tekanan pada *Patch* Ketiga dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.62 Distribusi Tekanan pada *Patch* Keempat dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.63 Distribusi Tekanan pada *Patch* Kelima dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



4.5.2 Deformasi

Tabel 4.10 berikut menunjukkan nilai deformasi yang dihasilkan akibat pengaruh pembebanan tekanan yang diberikan sepanjang geometri *tubing* pada masing-masing sensitivitas *meshing* diukur berdasarkan *fixed support* pada ujung-ujung sambungan *tubing*.

Tabel 4.10 Deformasi pada *Flow Rate* 1200 bpd

Lokasi	<i>Meshing</i> Kasar (m)	<i>Meshing</i> Medium (m)	<i>Meshing</i> Halus (m)
0 inch	0	0	0
36 inch	2,0787e-008	5,3367e-009	1,0436e-008
72 inch	5,2177e-008	1,5637e-008	2,6520e-008
108 inch	6,2510e-008	2,3860e-008	3,3823e-008
144 inch	4,3738e-008	1,8996e-008	2,3988e-008
180 inch	1,5499e-008	7,1707e-009	8,4741e-009
216 inch	0	0	0

Berdasarkan pembebanan tekanan yang diberikan akibat pengaruh *flow rate* sepanjang geometri *tubing*, dapat diketahui bahwa deformasi paling besar terjadi pada jarak 108 inch dari dasar *tubing* pada geometri masing-masing variasi *meshing*. Nilai deformasi yang ditimbulkan yaitu sebesar 6,2510e-008 m untuk *meshing* kasar, 2,3860e-008 m untuk *meshing* medium, dan 3,3823e-008 m untuk *meshing* halus.

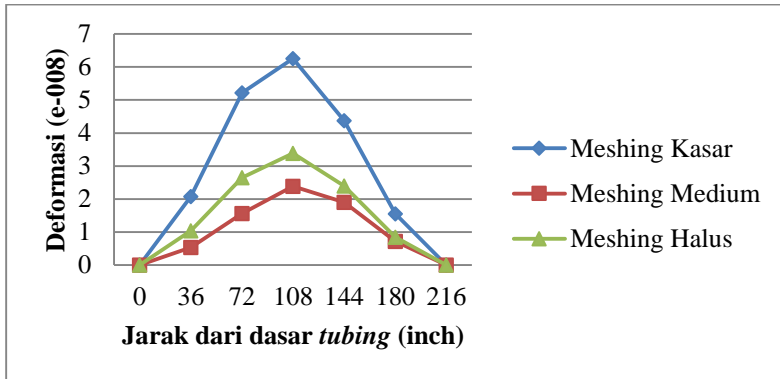
Hal tersebut diakibatkan karena *patch* yang terletak pada jarak 108 inch merupakan lokasi terjauh dari *fixed support* ujung sambungan atas maupun bawah. Meskipun tekanan yang terjadi pada daerah tersebut tidak sebesar tekanan pada dasar *tubing* yang merupakan lokasi awal terjadinya aliran fluida, tetapi kemampuan geometri dalam menahan pengaruh pembebanan yang diberikan tidak cukup kuat sehingga deformasi terjadi secara maksimum.

Pada ujung bawah sambungan *tubing* yang disebut sebagai lokasi 0 inch dan ujung atas sambungan *tubing* yang disebut sebagai lokasi 216 inch, deformasi yang terjadi yaitu sebesar 0 atau



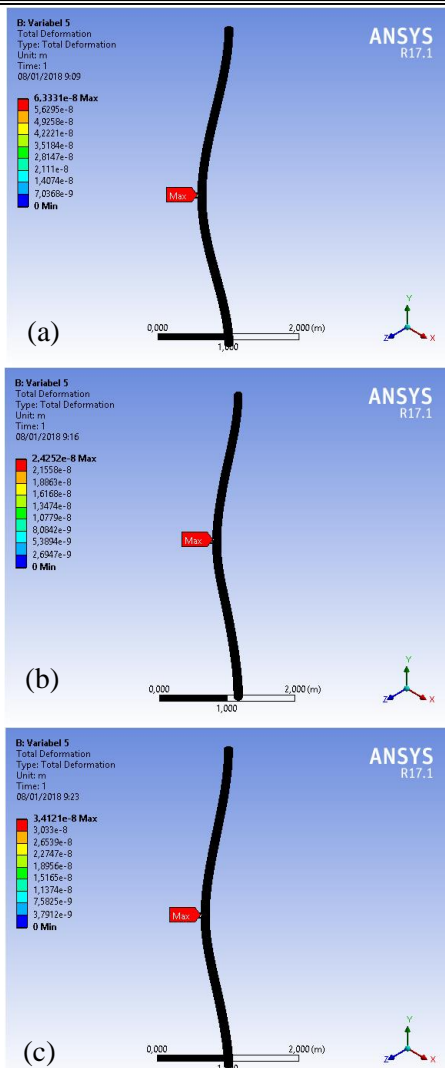
dapat dikatakan tidak terjadi deformasi. Hal tersebut karena ujung atas dan ujung bawah sambungan *tubing* merupakan lokasi di mana *fixed support* diterapkan.

Distribusi deformasi yang terjadi dapat dilihat pada grafik dalam Gambar 4.62 berikut.

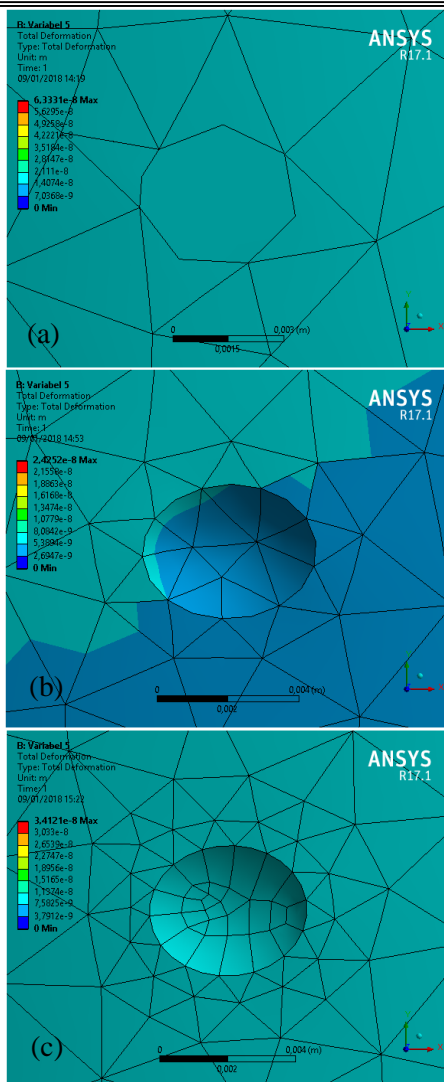


Gambar 4.64 Deformasi pada *Flow Rate* 1200 bpd

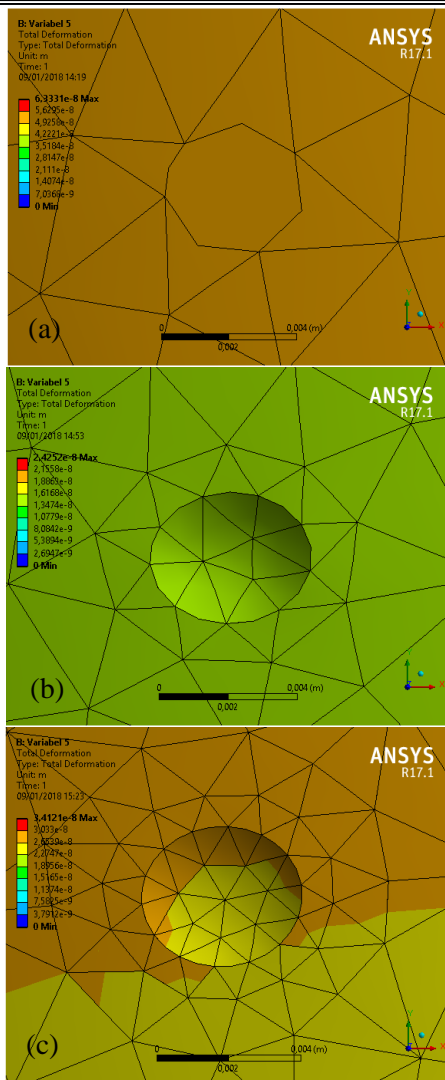
Berikut merupakan hasil deformasi di setiap lubang dengan lokasi dan jenis *meshing* yang berbeda pada *flow rate* 1200 bpd.



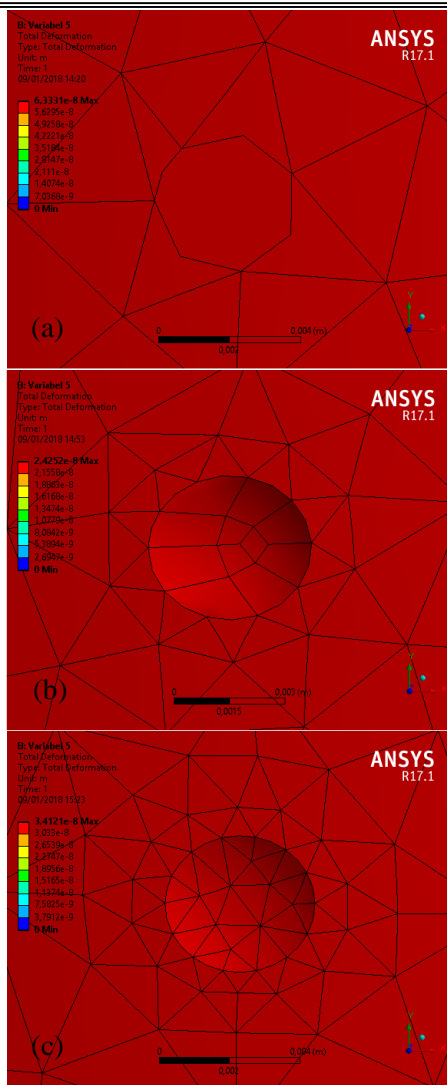
Gambar 4.65 Deformasi Sepanjang Tubing dengan Flow Rate 1200 bpd, pada (a) meshing kasar, (b) meshing medium, dan (c) meshing halus



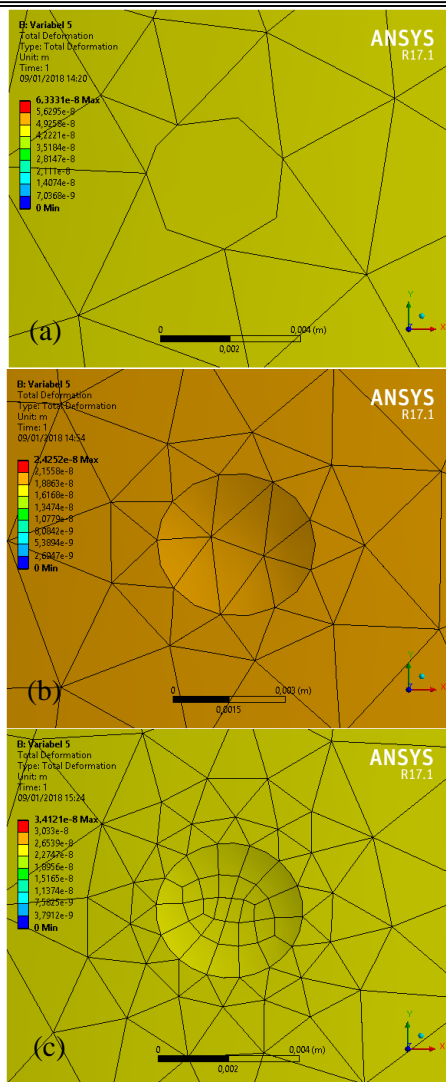
Gambar 4.66 Deformasi pada *Patch* Pertama dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



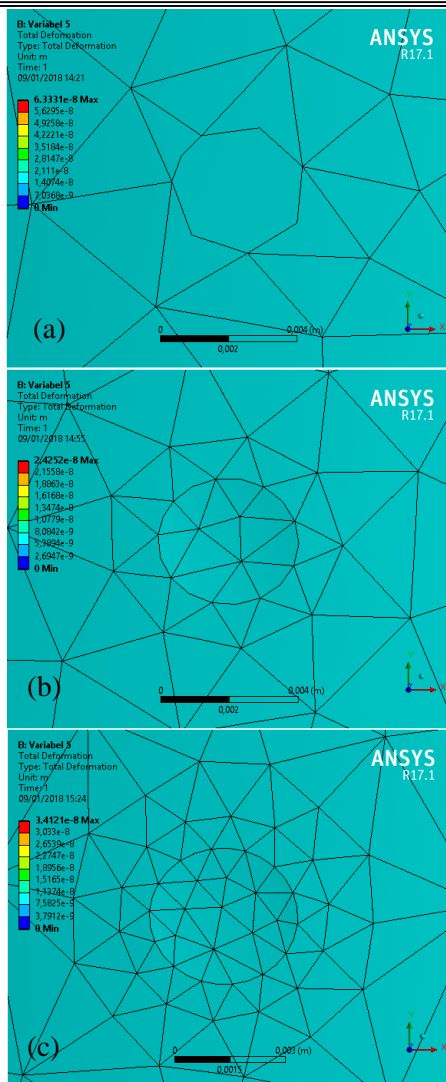
Gambar 4.67 Deformasi pada Patch Kedua dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.68 Deformasi pada Patch Ketiga dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.69 Deformasi pada *Patch* Keempat dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



Gambar 4.70 Deformasi pada *Patch* Kelima dengan *Flow Rate* 1200 bpd, pada (a) *meshing* kasar, (b) *meshing* medium, dan (c) *meshing* halus



4.6 Analisis *Flow Rate* dan Tekanan Optimum

Dalam simulasi ini, fluida yang diasumsikan mengalir secara laminar dan dalam kondisi *steady state* diberikan variasi *flow rate* yang telah dikonversi menjadi input kecepatan sehingga dapat bergerak secara vertikal ke atas sepanjang *tubing* yang berukuran panjang 216 inch atau setara dengan 5,4864 meter dan diameter luar 4,5 inch dengan ketebalan 0,271 inch.

Di sisi bagian depan *tubing*, diasumsikan terjadi kebocoran pada 5 titik dengan ketinggian berbeda yang terletak secara paralel. Lubang kebocoran tersebut dibuat seragam dengan asumsi diameter sebesar 0,15 inch. Selanjutnya lubang tersebut telah dilakukan *patching* menggunakan material *polyacrylamide* dengan daya kohesi sebesar 39800 joule/mol sehingga diperoleh tegangan sebesar 665,8 MPa.

Variasi *flow rate* yang disimulasikan yaitu sebesar 1000 barrel per hari hingga 1200 barrel per hari. Variasi tersebut dilakukan berdasarkan data lapangan dari aliran fluida pengeboran. *Flow rate* tersebut akan menghasilkan nilai penurunan tekanan sepanjang geometri vertikal *tubing*. Hal tersebut dilakukan untuk menunjukkan kemampuan pelekatan *patch* ditinjau dari pengaruh tekanan yang dihasilkan selama aliran fluida.

Berdasarkan data-data *flow rate* dan tekanan serta pengaruhnya terhadap terjadinya deformasi pada lokasi *patch* yang telah disebutkan pada Tabel 4.1 sampai Tabel 4.10 di atas, dapat diketahui bahwa geometri dengan *meshing* halus memiliki sensitivitas paling tinggi terhadap input *flow rate* yang diberikan.

Variasi *flow rate* yang diberikan akan menghasilkan nilai deformasi yang beragam. Hasil yang diperoleh dari variasi *flow rate* tersebut yaitu semakin besar *flow rate*, maka akan semakin besar pula kemungkinan terjadinya deformasi *patch* pada lokasi *in situ well repair*. Hal tersebut ditunjukkan dari nilai deformasi maksimum yang diperoleh pada masing-masing variasi *flow rate*.

Aliran fluida pada pipa vertikal akan mengalami penurunan tekanan sepanjang geometri pipa yang dilalui fluida tersebut. Menurut Malau (2012), adanya kehilangan tekanan (*pressure loss*)



pada aliran fluida melalui pipa vertikal diakibatkan oleh adanya gesekan yang terjadi di sepanjang permukaan pipa. Sebenarnya tekanan tersebut tidak hilang, hanya saja karena terjadi tegangan geser, sebagian energinya akan berubah dalam bentuk lain seperti energi panas, bunyi, dan lain-lain.

Seiring dengan panjangnya pipa yang dilalui, maka nilai *pressure drop* akan semakin besar (Negara, 2010). Hal ini sesuai dengan hasil simulasi penelitian yang menunjukkan bahwa tekanan pada lubang yang berjarak 180 inch dari dasar *tubing* mengalami penurunan yang paling besar.

Deformasi pada *patch* yang dihasilkan dari variasi tekanan tersebut akan meningkat apabila tekanannya bertambah besar. Semakin besar tekanan, maka akan semakin besar pula kemungkinan terjadinya deformasi *patch* pada lokasi *in situ well repair*. Namun, keberadaan *fixed support* juga akan mempengaruhi kemungkinan terjadinya deformasi.

Pada umumnya, kemungkinan terjadinya deformasi *patch* terbesar berada pada lokasi terjauh dari penahan pembebanan yang diberikan. Dalam hal ini, lokasi tersebut berada pada jarak 108 inch dari *fixed support* di ujung atas dan bawah sambungan *tubing*. Kondisi tersebut merupakan kondisi tidak ideal karena dengan pengaruh tekanan yang tidak terlalu besar, deformasi tetap dapat terjadi.

Kondisi paling ideal pada *in situ well repair* yang telah disimulasikan berdasarkan pengaruh *flow rate* dan tekanan dalam penelitian ini adalah dengan minimum *flow rate* yang diberikan, yaitu sebesar 1000 bpd. Deformasi minimum yang terjadi pada *patch* yaitu sebesar 1,953e-008 m. Nilai tekanan yang menghasilkan deformasi minimum tersebut yaitu sebesar 36,82 Pa.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain:

1. Semakin besar *flow rate*, maka akan semakin besar pula kemungkinan terjadinya deformasi *patch* pada lokasi *in situ well repair*.
2. Semakin besar tekanan, maka akan semakin besar pula kemungkinan terjadinya deformasi *patch* pada lokasi *in situ well repair*.
3. *Flow rate* yang menghasilkan kemampuan *in situ well repair* paling optimum adalah 1000 bpd dengan nilai tekanan sebesar 36,82 Pa pada lokasi *patch* dengan jarak 180 inch dari dasar *tubing*.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Dilakukan penelitian dengan menggunakan analisis secara *transient* atau *dynamic explicit* agar diperoleh hasil yang lebih presisi.
2. Dilakukan penelitian untuk kemungkinan terjadinya kebocoran *tubing* pada tingkat kedalaman yang lebih bervariasi.
3. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai material *patch* lain agar dapat diketahui material yang paling sesuai dengan kondisi kebocoran *tubing*.



(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- API, 5. (2005). *Specification for Casing and Tubing*. Washington D.C: American Petroleum Institute.
- API, 5. (2010). *Specification for Drill Pipe*. Washington D.C: American Petroleum Institute.
- Bangun, W. P., Widiyarta, I. M., & Parwata, I. M. (2017). Pengaruh Waktu dan Ukuran Partikel Dry Sand Blasting terhadap Kekasaran Permukaan pada Baja Karbon Sedang. *Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanika*, 138-141.
- Book, C. (2017). *Polyacrylamide*. Dipetik September 3, 2017, dari Chemical Book: http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB7390058.htm
- Carolina Andrade de Sousa, O. J. (2017). Influence of Oil Leakage in the Pressure and Flow Rate Behaviors in Pipeline. *Latin American Journal of Energy Research*, 17-29.
- Chris Alexander, H. P. (2005). Modeling Leakage in a Fuel Transfer Pipeline Using Computational Fluid Dynamics Techniques. *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference* (hal. 1-11). Denver: ASME.
- Department of Petroleum Engineering. (2005). *Drilling Engineering*. Edinburgh: Heriot-Watt University.
- Devold, H. (2013). *Oil and Gas Production Handbook: An Introduction to Oil and Gas Production, Transport, Refining and Petrochemical Industry*. Oslo: ABB Oil and Gas.
- Esen, H., Inalli, M., & Esen, Y. (2009). *Temperature Distribution in Boreholes of A Vertical Ground-Coupled Heat Pump System*. Elazig: Firat University.
- Genedy, M., Kandil, U. F., Matteo, E. N., Stormont, J., & Taha, M. M. (2016). A New Polymer Nanocomposite Repair Material for Restoring Wellbore Seal Integrity. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 290-297.

- Hendrizal, I. P., & Djunaidi, Z. (2013). *Analisis Risiko pada Pipa 6" Crude Oil SP PDT I - SP Tambun di PT Pertamina EP Region Jawa Field Tambun*. Depok: Universitas Indonesia.
- Hermadi, G. (2010). Analisis Perbandingan Efektifitas Model Fluida Bingham dan Power Law dalam Optimasi Flow Rate Pompa dan Pengangkatan Cutting. *Forum Teknologi*, 13.
- Ibrahim, M. A., & Irawan, S. (2016). *Absorption Properties of Superabsorbent Polymers for Sealing Tubing Leaks*. Bandar Seri Iskandar: Universiti Teknologi PETRONAS.
- Institute, A. P. (2001). *API Specification 5CT: Specification for Casing and Tubing Seventh Edition*. Washington DC: American Petroleum Institute.
- Khandka, R. K. (2007). *Leakage Behind Casing*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- L. S. Riza, A. T. (2009). Pengembangan Perangkat Lunak untuk Simulasi Estimasi Volume Kebocoran Minyak. *Jurnal Pendidikan Teknologi Informasi dan Komunikasi (PTIK)*, 33-34.
- Li, X., Ji, H., & Li, Y. (2012). Fluent in the Simulation of the Application of the Natural Gas Leakage. *International Conference on Mechanical Engineering and Material Science* (hal. 690-692). Shanghai: Atlantis Press.
- Malau, J., & Sitepu, T. (2012). Analisa Pressure Drop pada Sistem Perpipa Fuel Oil Boiler pada PT PLN Pembangunan Sumatera Bagian Utara Sicanang-Belawan dengan Menggunakan Pipe Flow Expert. *Jurnal e-Dinamis Volume 3*, 164-171.
- Negara, W. P. (2010). Perbandingan Analisis Pressure Drop pada Pipa Lengkung 90o Standar ANSI B36.10 dengan COSMOSfloWorks 2007. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Gunadarma*, 1-13.
- Ouyang, L.-B. (2015). A Novel Approach to Detect Tubing Leakage in Carbon Dioxide (CO₂) Injection Wells via an

- Efficient Annular Pressure Monitoring. *The Open Petroleum Engineering Journal*, 8-15.
- Samuel Eshorame Sanni, A. S. (2014). Modeling of Sand and Crude Oil Flow in Horizontal Pipes during Crude Oil Transportation. *Journal of Engineering*, 1-7.
- Shuwei Wang, G. W. (2012). CFD for Multiphase Flow Transport of Buried Crude Oil Pipelines Leakage. *International Conference on Pipelines and Trenchless Technology* (hal. 861-874). Wuhan: Li Dong.
- Sousa, J. V., Sodre, C. H., Lima, A. G., & Neto, S. R. (2013). Numerical Analysis of Heavy Oil-Water Flow and Leak Detection in Vertical Pipeline. *Advance in Chemical Engineering and Science*, 9-15.
- Styler, J. W., Al-Suwailem, S. S., Akhnoukh, R. L., & Leighton, J. R. (2001). A Unique Rigless Casing Leak Repair, Ghawar Field, Saudi Arabia. *SPE Middle East Oil Show* (hal. 1-6). Manama: Society of Petroleum Engineers Inc.
- Sukandi. (2008). *Analisa Faktor-Faktor Dispersi Mutu dan Kemampuan Proses pada Proses Heat Treatment Pipa Casing L80*. Jakarta: Universitas Mercu Buana.
- Tianhan Xu, Y. F. (2010). Evaluation of Mechanical Properties and Microstructures of Casing-Drilling Steels. *Advanced Materials Research*, 674-677.
- Todorovic, J. (2015). *Mitigation and Remediation of Leakage from Geological Storage*. Trondheim: SINTEF Petroleum AS.
- Todorovic, J., Røphaug, M., Lindeberg, E., Vrålstad, T., & Buddensiek, M.-L. (2016). Remediation of Leakage through Annular Cement Using a Polymer Resin: a Laboratory Study. *Energy Procedia*, 442-449.
- U.S. Steel Tubular Products. (2014). *Oil Country Tubular Goods*. Pittsburgh: U.S. Steel Tubular Products.
- (2004). *Wells with Casing Leaks*. Winnipeg: Manitoba Industry, Economic Development and Mines.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

1. Perhitungan input *velocity inlet* berdasarkan nilai *flow rate* pada proses pengeboran minyak bumi dan gas alam.

Diketahui:

- *Flow rate* pada proses pengeboran minyak bumi dan gas alam berkisar antara 1000 hingga 1200 barrel per hari.
- Luas penampang alas pipa bagian dalam sebesar 12,304 inch².

Ditanyakan: Nilai input *velocity inlet* = ... ?

Jawab:

$$\begin{aligned} \text{Area} &= 12,304 \text{ inch}^2 \\ &= 0,00793804864 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Mencari nilai kecepatan

$$\text{velocity} = \frac{\text{flow rate}}{\text{area}}$$

Variabel 1

$$\begin{aligned} \text{Flow rate} &= 1000 \text{ barrel per hari} \\ &= 0,0018 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocity} &= \frac{0,0018 \text{ m}^3/\text{s}}{0,00793804864 \text{ m}^2} \\ &= 0,2267559802 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Variabel 2

$$\begin{aligned} \text{Flow rate} &= 1050 \text{ barrel per hari} \\ &= 0,00189 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocity} &= \frac{0,00189 \text{ m}^3/\text{s}}{0,00793804864 \text{ m}^2} \\ &= 0,2380937792 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Variabel 3

$$\begin{aligned} \text{Flow rate} &= 1100 \text{ barrel per hari} \\ &= 0,00198 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocity} &= \frac{0,00198 \text{ m}^3/\text{s}}{0,00793804864 \text{ m}^2} \\ &= 0,2494315782 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Variabel 4

$$\begin{aligned} \text{Flow rate} &= 1150 \text{ barrel per hari} \\ &= 0,00207 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocity} &= \frac{0,00207 \text{ m}^3/\text{s}}{0,00793804864 \text{ m}^2} \\ &= 0,2607693772 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Variabel 5

$$\begin{aligned} \text{Flow rate} &= 1200 \text{ barrel per hari} \\ &= 0,00216 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocity} &= \frac{0,00216 \text{ m}^3/\text{s}}{0,00793804864 \text{ m}^2} \\ &= 0,2721071762 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Jadi, nilai input *velocity inlet* adalah sebesar

Variabel	Flow Rate (bpd)	Velocity Inlet (m/s)
1	1000	0,2267559802
2	1050	0,2380937792
3	1100	0,2494315782
4	1150	0,2607693772
5	1200	0,2721071762

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pembuatan laporan tugas akhir ini, penulis mendapat banyak bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah SWT, atas berkat rahmat dan nikmat-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik.
2. Orang tua penulis, Bapak Achmad Fathoni dan Ibu Lailatul Mas'udah yang selalu mendoakan dan memberikan semangat, dukungan, cinta kasih, dan motivasi.
3. Saudara kandung penulis, Farel Muhammad S.H dan Bobby Thariq K.A serta seluruh keluarga yang telah memberikan semangat, dukungan, dan motivasi.
4. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D. dan Bapak Sungging Pintowantoro, Ph.D. selaku dosen pembimbing yang membimbing penulis dalam mengerjakan laporan tugas akhir dan memberikan banyak ilmu terkait tugas akhir yang dikerjakan oleh penulis.
5. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng. selaku Ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
7. Bapak Mas Irfan P. Hidayat selaku dosen wali yang sangat sabar dan mengayomi selama penulis menempuh pendidikan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
8. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
9. Bu En dan Bu Ayunda yang selalu memberi semangat selama penulis menyelesaikan laporan tugas akhir.
10. Alfarady Raja G.H.J dan Alvieta M. Haykal F, saudara sekaligus seseorang yang membantu pengadaan *software* ANSYS.

11. Febriyani Aulia Dini, sahabat terbaik sejak masa putih-biru yang selalu ada saat suka maupun duka, yang setia berbagi cerita, serta memberikan semangat, dukungan, dan motivasi di saat-saat tertinggi maupun terendah penulis.
12. Niken Arina Pratiwi, sahabat sejak masa putih-biru yang memberikan semangat serta sangat menghibur dengan canda-tawa dan kata-katanya yang lepas dan ringan.
13. Geri Yesa Ermawan, sahabat yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan motivasi serta setiap saat menawarkan bantuan bila penulis membutuhkan.
14. Sahabat terbaik, yaitu para ICW yang beranggotakan Padella Dian J.A, Shabrina Rahma S, dan Najla Irhamni Phasa, beserta Febriyani Aulia Dini dan Niken Arina Pratiwi, yang telah mewarnai hidup penulis dengan berbagai cerita sejak masa putih abu-abu.
15. Sahabat terbaik, yaitu para Tipis Pertemanan yang beranggotakan Dani Wulandari, Mimi Nur Indah Sari, Hadi Utomo, Reyhan Efriansyah, dan Heti Pratiwi, yang selalu memberikan energi positif selama menjalani masa perkuliahan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
16. Raditya N. Mobiliu, sahabat yang tak henti-hentinya memberikan semangat, nasihat, dan selalu mengingatkan kepada Allah SWT dalam setiap langkah.
17. Rendi, sahabat yang selalu mencekoki penulis dengan kata-kata pedasnya sebagai bom pemicu semangat, untuk tetap berjuang menggapai mimpi, agar suatu saat bisa bertemu kembali sebagai alumni Massachusetts Institute of Technology.
18. Arifa Nuriyani, teman dengan topik tugas akhir yang sama.
19. Fauzi Perdana dan M. Fathur Rizki, teman baik yang memberikan ilmu dan masukan-masukan terkait proses simulasi.
20. Mas Ridho, Hendy Roesma W, Dimas Bagus, dan teman-teman Laboratorium Komputasi dan Permodelan DTMM

FTI-ITS yang telah banyak membantu serta memberikan cerita, pengalaman, dan pembelajaran kepada penulis.

21. Teman-teman LDJ Ash-Haabul Kahfi DTMM FTI-ITS 2016/2017 yang memberikan cerita, pengalaman, dan pembelajaran kepada penulis.
22. Teman-teman seperjuangan MT16 yang memberikan banyak cerita dalam kehidupan penulis selama berkuliah di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
23. Dan seluruh pihak yang telah berpartisipasi dalam pengerjaan tugas akhir ini.
24. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Jombang pada tanggal 30 Mei 1998. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Achmad Fathoni dan Lailatul Mas'udah. Riwayat pendidikan yang ditempuh oleh penulis yaitu antara lain SD Negeri 2 Grogol, SMP Negeri 1 Jombang, SMA Negeri 3 Jombang, dan melanjutkan jenjang pendidikan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Selama berkuliah, penulis mengikuti kegiatan seminar, pelatihan, dan organisasi. Penulis pernah menjadi staff Departemen Humas LDJ Ash-Haabul Kahfi DTMM FTI-ITS 2015/2016 dan staff Unit Kerja Khusus HMMT FTI-ITS 2015/2016, serta menjabat sebagai Koordinator Putri Departemen Syiar LDJ Ash-Haabul Kahfi DTMM FTI-ITS 2016/2017. Selain itu, penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Fisika Material 2015.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktik di PT Dirgantara Indonesia (Persero) yang dilaksanakan di Bandung pada tanggal 11 Juli sampai 14 Agustus 2017. Selama melaksanakan kerja praktik, penulis mendapatkan topik mengenai “Analisis Perbandingan Proses *Solution Heat Treatment* Aluminium 7075 Bare Komponen Helikopter NBELL-412 pada Media *Air Furnace* dan *Salt Bath*”.

Tugas akhir yang dikerjakan penulis ini berjudul “Analisis Pengaruh *Flow Rate* dan *Pressure* pada *In Situ Well Repair* Menggunakan Material *Polyacrylamide* dengan CFD-FEM *Coupling Method*”.

Email: halidaaflh@engineer.com

(halaman ini sengaja dikosongkan)